



**Helena Sofia
Rodrigues Oliveira**

**Estudo da aplicação de cinza de biomassa sobre o
perfil de um solo**



**Helena Sofia
Rodrigues Oliveira**

Estudo da aplicação de cinza de biomassa sobre o perfil de um solo

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto PTDC/AAC – AMB/098112/2008, “(Bias-to-soil) Cinzas de biomassa: Caracterização em relação à sua origem, tratamento e aplicação no solo”, financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia

o júri

Presidente

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais

Professora Doutora Etelvina Maria de Almeida Paula Figueira

Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes

Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Prof. Doutora Ana Paula Gomes, pela ajuda, dedicação e apoio prestado durante a execução deste trabalho, pela partilha de conhecimentos, pelas críticas e sugestões e pela enorme disponibilidade que sempre apresentou.

Às técnicas de laboratório do Departamento de Ambiente e Ordenamento pela ajuda no decorrer do trabalho experimental, em especial à Doutora Diana Patoilo pela ajuda prestada e por todo o tempo despendido.

Agradeço também à minha família pelo apoio e incentivo que sempre me deu.

A todos os outros que de um modo ou de outro me apoiaram.

Aos meus colegas de curso e amigos agradeço pela amizade e companheirismo que fizeram este caminho mais fácil e agradável de percorrer.

palavras-chave

Cinza de biomassa, perfil de solo, poder neutralizante, lixiviação, extração, macronutrientes

resumo

Tendo em conta o elevado crescimento da população a nível mundial e a necessidade de produção de alimento, surge a urgência em melhorar as características dos solos para que possam ser utilizados da forma mais eficiente possível. Por outro lado, sabe-se que a biomassa florestal apresenta um elevado potencial no que respeita ao seu uso como combustível, podendo contribuir para as necessidades energéticas do nosso país. Desta forma, o material resultante da queima de biomassa florestal, nomeadamente, a cinza de biomassa, pode ser utilizado no melhoramento das características do solo florestal e do solo agrícola. As propriedades da cinza de biomassa e a sua elevada influência principalmente nas características químicas do solo, evidenciam a importância do estudo da sua aplicação.

No presente trabalho o objetivo principal consistiu em estudar a influência da cinza de biomassa nas características químicas e físicas do solo, a sua influência na mobilização de nutrientes por lixiviação, a distribuição de nutrientes ao longo do perfil de um solo e a influência da cinza de biomassa no crescimento das plantas.

O trabalho experimental realizado revelou que a cinza de biomassa tem uma grande influência no pH do solo, contribuindo para o seu aumento e estabilização. Verificou-se que a quantidade de cada elemento presente no lixiviado representa uma pequena fração relativamente à quantidade do mesmo presente no solo, com exceção dos nitratos e do zinco. A carga de cinza aplicada, revelou uma baixa influência na concentração dos elementos químicos analisado no solo e no lixiviado. No entanto, verificou-se que a adição de lama, em conjunto com a cinza de biomassa, diminui a biodisponibilidade de alguns elementos no solo, uma vez que a matéria orgânica presente na lama, vai contribuir para o aprisionamento desses elementos. Com a realização de duas extrações, aquosa e de Mehlich III, pode perceber-se que, através a extração de Mehlich, é possível extrair uma maior quantidade de todos os elementos, à exceção do cálcio. Através do teste de fitotoxicidade realizado, não se observa qualquer influência positiva da aplicação de cinza de biomassa no crescimento das plantas.

keywords

Wood ash, soil profile, neutralizing power, leaching, extraction, macronutrients.

abstract

Taking in account that the world population and the need for food production is growing at a high pace, emerges a urgent need in improving the characteristics of the soil in order for it to be used as efficiently as possible. Moreover, it is known that the forest biomass has a high potential to be used as fuel, and it can contribute to the energetic needs of our country. So, the material that results from the combustion of forest biomass, namely wood ash, may have its use in improving forest soil characteristics and agricultural soil characteristics. The properties of wood ash and its high influence, mainly on soil chemical characteristics, show the significance of the study of its application.

In this work the aim was to study the influence of the wood ash on the chemical and physical characteristics of the soil, its influence one the mobilization of nutrients by leaching, the nutrient distribution along the soil profile, and the influence of wood ash on plant growth.

The experimental work revealed that the wood ash as a major influence on soil pH, contributing to its increase and stabilization. It was found that, the amount of each element in the leachate represents a small fraction relatively to the amount present in the soil, except for nitrate and zinc. The load of wood ash applied, revealed a small influence on the concentration of the chemical elements analyzed in the soil and in the leachate. However, it was found that the addition of sludge, together with wood ash, reduces the bioavailability of certain elements in the soil, since the organic matter present in the sludge contributes to the entrapment of these elements. By conducting two extractions, aqueous and Mehlich III, we realize that, with the Mehlich III extraction, it is possible to extract a greater amount of all the elements, except calcium. Through the phytotoxicity test it wasn't observed any positive effect of the application of wood ash on plant growth.

Índice

Índice de tabelas	v
Índice de figuras	vii
Nomenclatura.....	xv
1. Introdução	1
1.1. Motivação do trabalho	3
1.2. Objetivos da investigação	4
1.3. Enquadramento legal	4
1.4. Organização da Tese	7
2. Aplicação de cinza de combustão no solo	9
2.1. Características da cinza	9
2.1.1. Físicas	9
2.1.2. Químicas	9
2.1.2.1. Alcalinidade	9
2.1.2.2. Macro elementos	10
2.1.2.3. Micro elementos	10
2.2. Efeito das cinzas de biomassa nas características do solo	11
2.2.1. Propriedades físicas.....	11
2.2.2. Propriedades químicas.....	11
2.2.2.1. Acidez do solo.....	11
2.2.2.2. Macro elementos	12
2.2.2.3. Micro elementos	13
2.3. Efeito das cinzas de biomassa nas características das plantas	13
2.4. Principais problemas de aplicação	14
2.5. Principais benefícios de aplicação.....	15
3. Ensaio experimentais.....	17
3.1. Metodologia	17
3.1.1. Origem do solo para o estudo	17

3.1.2.	Método de recolha do solo	17
3.1.3.	Ensaio experimentais.....	17
3.1.4.	Procedimentos analíticos	18
3.2.	Materiais e métodos	18
3.2.1.	Local de estudo	19
3.2.2.	Método de recolha do solo	20
3.2.3.	Ensaio experimentais.....	21
3.2.3.1.	Cinza de biomassa	21
3.2.3.2.	Perfil de solo	22
3.2.3.3.	Montagem das colunas para os testes de lixiviação	23
3.2.3.4.	Parâmetros analisados	25
3.2.3.5.	Teste de fitotoxicidade	25
3.2.4.	Procedimentos analíticos	26
3.2.4.1.	Determinação da capacidade de campo	26
3.2.4.2.	Preparação das amostras	29
3.2.4.3.	Determinação do pH	29
3.2.4.4.	Determinação da condutividade	29
3.2.4.5.	Análise Granulométrica.....	30
3.2.4.6.	Determinação do poder neutralizante da cinza.....	30
3.2.4.7.	Determinação da carga de cinza a aplicar no solo	30
3.2.4.8.	Determinação da matéria orgânica através dos sólidos voláteis.....	32
3.2.4.9.	Determinação da matéria orgânica através do carbono orgânico.....	32
3.2.4.10.	Extração aquosa para posteriores testes ecotoxicológicos	32
3.2.4.11.	Extração de Mehlich III	33
3.2.4.12.	Determinação de nitratos em solução	33
3.2.4.13.	Determinação do fósforo em solução	33
3.2.4.14.	Determinação de metais em solução.....	34
4.	Resultados	35
4.1.	Caracterização dos materiais iniciais	35
4.1.1.	Cinza de biomassa	35

4.1.1.1.	Condutividade e pH.....	35
4.1.1.2.	Poder neutralizante e quantidade a aplicar	35
4.1.1.3.	Elementos químicos	36
4.1.2.	Lama	37
4.1.2.1.	Humidade e pH.....	37
4.1.2.2.	Matéria orgânica	38
4.1.2.3.	Elementos químicos	38
4.1.3.	Água para o teste de lixiviação.....	38
4.1.4.	Solo inicial.....	39
4.1.4.1.	Condutividade e pH.....	39
4.1.4.2.	Matéria orgânica	40
4.1.4.3.	Análise granulométrica	40
4.1.4.4.	Humidade e capacidade de campo	41
4.1.4.5.	Elementos químicos	41
4.2.	Teste de lixiviação	43
4.2.1.	Caracterização do lixiviado.....	43
4.2.1.1.	Condutividade e pH.....	43
4.2.1.2.	Elementos químicos	46
4.2.2.	Caracterização do solo	75
4.2.2.1.	Condutividade e pH.....	76
4.2.2.2.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas referência, extração aquosa	82
4.2.2.3.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza, extração aquosa	84
4.2.2.4.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de CaCO_3 , extração aquosa	87
4.2.2.5.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza + lama, extração aquosa	90
4.2.2.6.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas referência, extração de Mehlich.....	93

4.2.2.7.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza, extração de Mehlich.....	96
4.2.2.8.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de CaCO_3 , extração de Mehlich.....	98
4.2.2.9.	Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza + lama, extração de Mehlich.....	101
4.2.2.10.	Extração aquosa e extração de Mehlich – distribuição dos elementos pelas camadas	103
4.2.2.11.	Balanço mássico às colunas de lixiviação pela extração aquosa.....	104
4.2.2.12.	Balanço mássico às colunas de lixiviação pela extração de Mehlich	113
4.2.2.13.	Extração aquosa e extração de Mehlich – balanço mássico	120
4.2.3.	Teste de fitotoxicidade, ou crescimento	121
5.	Conclusões.....	123
6.	Bibliografia.....	125
6.1.	Legislação consultada.....	128
Anexo A –	Titulação realizada para determinação do poder neutralizante da cinza	129
Anexo B –	Resultados de massa de elemento nas colunas através da extração aquosa.....	131
Anexo C –	Resultados de massa de elemento nas colunas através da extração de Mehlich	141

Índice de tabelas

Tabela 1 - Valores limite de concentração de metais pesados nas lamas e de quantidades anuais que podem ser introduzidas nos solos cultivados (Decreto-Lei nº 276/2009)	5
Tabela 2 - Valores limite de concentração de metais pesados nos solos recetores (Decreto-Lei nº 276/2009).....	5
Tabela 3 - Valores paramétricos para o controlo da qualidade da água para consumo humano (Decreto-Lei nº 306/2007)	6
Tabela 4 - Valores máximos admissíveis para água de rega (Decreto-Lei nº 236/98)	6
Tabela 5 - Descrição dos ensaios efetuados em laboratório	18
Tabela 6 - Parâmetros escolhidos para análise.....	25
Tabela 7 - Classificação do solo utilizado para a realização dos ensaios experimentais	31
Tabela 8 - Valores utilizados para a determinação da quantidade de CaO a aplicar no solo	31
Tabela 9 - Valores de pH e de condutividade obtidos no extrato aquoso de cinza de biomassa....	35
Tabela 10 - Valores obtidos para o poder neutralizante da cinza de biomassa	36
Tabela 11 - Quantidade de cinza de biomassa e óxido de cálcio, ou carbonato de cálcio, a adicionar ao solo	36
Tabela 12 - Valores de metais pesados obtidos nos extratos de cinza de biomassa (ppm)	36
Tabela 13 - Valores de Nitratos, P, Ca, Mg, Na, K e Fe obtidos nos extratos de cinza de biomassa (ppm).....	37
Tabela 14 - Valores de pH obtidos para a lama utilizada.....	37
Tabela 15 - Valores de metais pesados obtidos no extrato aquoso da lama (ppm).....	38
Tabela 16 - Valores de Nitratos, P, Ca, Mg, Na, K e Fe obtidos no extrato aquoso da lama (ppm) .	38
Tabela 17 - Valores de pH obtidos para o solo inicial	39
Tabela 18 - Valores obtidos para a fração mássica de matéria orgânica presente no solo inicial ..	40
Tabela 19 - Valores obtidos na caracterização do solo inicial.....	41
Tabela 20 - Valores obtidos de Nitratos, P, Ca, Mg, Na, K e Fe para o solo inicial pela extração aquosa (ppm)	42
Tabela 21 - Valores obtidos de metais pesados para o solo inicial pela extração aquosa (ppm)....	42
Tabela 22 - Valores obtidos de P, Ca, Mg, Na, K e Fe para o solo inicial pela extração de Mehlich (ppm).....	42
Tabela 23 - Valores obtidos de metais pesados para o solo inicial pela extração de Mehlich (ppm)	42
Tabela 24 - Valores de massa de erva seca obtida no teste de crescimento.....	122
Tabela 25 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna solo referência, extração aquosa	131
Tabela 26 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna solo referência, extração aquosa	132

Tabela 27 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração aquosa	133
Tabela 28 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração aquosa	134
Tabela 29 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza, extração aquosa	135
Tabela 30 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza, extração aquosa	136
Tabela 31 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de CaCO_3 , extração aquosa	137
Tabela 32 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de CaCO_3 , extração aquosa	138
Tabela 33 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna solo referência, extração de Mehlich.....	141
Tabela 34 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna solo referência, extração de Mehlich.....	142
Tabela 35 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração de Mehlich	143
Tabela 36 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração de Mehlich.....	144
Tabela 37 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza, extração de Mehlich.....	145
Tabela 38 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza, extração de Mehlich.....	146
Tabela 39 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de CaCO_3 , extração de Mehlich.....	147
Tabela 40 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de CaCO_3 , extração de Mehlich.....	148

Índice de figuras

Figura 1 - Amostras de cinza em pó e cinza em granulado	9
Figura 2 - Localização geográfica do local de amostragem	19
Figura 3 - Processo de recolha dos perfis de solo	20
Figura 4 - Granulometria da cinza de biomassa	21
Figura 5 - Perfil de solo inalterado nas colunas	22
Figura 6 - Montagem laboratorial das colunas	23
Figura 7 - Esquema da coluna com perfil de solo para a determinação da capacidade de campo .	26
Figura 8 - Análise granulométrica do solo inicial	40
Figura 9 - Valores obtidos de pH e condutividade para o lixiviado das oito colunas de lixiviação: réplicas #1 e #2 de solo de referência, cinza, cinza + lama e CaCO_3	46
Figura 10 - Valores obtidos de concentração de fósforo no lixiviado e da distribuição da massa de fósforo lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	49
Figura 11 - Valores obtidos de concentração de cálcio no lixiviado e da distribuição da massa de cálcio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	51
Figura 12 - Valores obtidos de concentração de magnésio no lixiviado e da distribuição da massa de cálcio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	54
Figura 13 - Valores obtidos de concentração de sódio no lixiviado e da distribuição da massa de sódio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	57
Figura 14 - Valores obtidos de concentração de potássio no lixiviado e da distribuição da massa de potássio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	59
Figura 15 - Valores obtidos de concentração de ferro no lixiviado e da distribuição da massa de ferro lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	62
Figura 16 - Valores obtidos de concentração de manganês no lixiviado e da distribuição da massa de manganês lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	64
Figura 17 - Valores obtidos de concentração de cobre no lixiviado e da distribuição da massa de cobre lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	67
Figura 18 - Valores obtidos de concentração de zinco no lixiviado e da distribuição da massa de zinco lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	70
Figura 19 - Valores obtidos de concentração de cádmio no lixiviado e da distribuição da massa de cádmio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	72
Figura 20 - Valores obtidos de concentração de nitratos no lixiviado e da distribuição da massa de nitratos lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação	75
Figura 21 - Esquema das colunas nos estados inicial e final do teste de lixiviação	76
Figura 22 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas solo referência	77
Figura 23 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas cinza	78
Figura 24 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas CaCO_3	80

Figura 25 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas cinza + lama.....	81
Figura 26 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	82
Figura 27 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	82
Figura 28 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	82
Figura 29 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	82
Figura 30 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	83
Figura 31 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	83
Figura 32 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	83
Figura 33 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	83
Figura 34 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	83
Figura 35 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	84
Figura 36 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	84
Figura 37 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	85
Figura 38 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	85
Figura 39 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	85
Figura 40 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	85
Figura 41 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	85
Figura 42 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	86
Figura 43 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	86

Figura 44 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	86
Figura 45 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	86
Figura 46 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	86
Figura 47 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	87
Figura 48 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	88
Figura 49 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	88
Figura 50 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	88
Figura 51 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	88
Figura 52 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	88
Figura 53 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	89
Figura 54 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	89
Figura 55 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	89
Figura 56 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	89
Figura 57 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	89
Figura 58 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	89
Figura 59 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	91
Figura 60 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	91
Figura 61 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	91
Figura 62 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	91

Figura 63 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	91
Figura 64 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	92
Figura 65 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	92
Figura 66 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	92
Figura 67 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	92
Figura 68 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	92
Figura 69 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	92
Figura 70 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	93
Figura 71 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	94
Figura 72 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	94
Figura 73 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	94
Figura 74 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	94
Figura 75 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	94
Figura 76 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	95
Figura 77 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	95
Figura 78 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	95
Figura 79 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	95
Figura 80 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	96
Figura 81 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	96

Figura 82 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	96
Figura 83 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	96
Figura 84 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	97
Figura 85 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	97
Figura 86 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	97
Figura 87 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	97
Figura 88 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	97
Figura 89 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	98
Figura 90 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	98
Figura 91 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	99
Figura 92 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	99
Figura 93 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	99
Figura 94 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	99
Figura 95 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	99
Figura 96 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	100
Figura 97 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	100
Figura 98 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	100
Figura 99 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	100
Figura 100 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	101

Figura 101 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	101
Figura 102 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	101
Figura 103 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	101
Figura 104 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	102
Figura 105 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	102
Figura 106 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	102
Figura 107 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	102
Figura 108 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)	102
Figura 109 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo).....	103
Figura 110 - Esquema das colunas inicial e final do teste de lixiviação com o material adicionado	104
Figura 111 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas solo referência, extração aquosa	107
Figura 112 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza, extração aquosa	109
Figura 113 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas CaCO ₃ , extração aquosa	111
Figura 114 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza + lama, extração aquosa.....	113
Figura 115 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas solo referência, extração Mehlich.....	115
Figura 116 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza, extração de Mehlich.....	116
Figura 117 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas CaCO ₃ , extração de Mehlich	118
Figura 118 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza + lama, extração Mehlich.....	120
Figura 119 - Aspeto da erva semeada, 15 dias após aplicação de cinza, lama e CaCO ₃	121

Figura 120 - Curva de titulação da cinza com hidróxido de sódio para determinação do poder neutralizante	129
Figura 121 - Determinação do ponto de equivalência da determinação da cinza com hidróxido de sódio através da primeira derivada $d(pH)/dV$ da curva de titulação	129
Figura 122 - Determinação do ponto de equivalência da determinação da cinza com hidróxido de sódio através da segunda derivada $d^2(pH)/d^2(V)$ da curva de titulação.....	129

Nomenclatura

At	Área da secção transversal da coluna	[m ²]
Ca	Cálcio	
CaCO ₃	Carbonato de cálcio	
CaO	Óxido de cálcio	
CC	Capacidade de campo do solo	[kg H ₂ O/kg ss]
C _{i,r}	Concentração do elemento químico i no lixiviado recolhido	[kg/L]
Cd	Cádmio	
Cr	Crómio	
C _{RE}	Capacidade de retenção específica do solo	[L água retida/L total]
Cu	Cobre	
D _A	Densidade aparente do solo	[kg ss/kg H ₂ O]
D(ano)	Dias do ano considerados no cálculo da pluviosidade diária	[dia]
Fe	Ferro	
f _{i,j}	Massa de elemento químico i presente no solo da camada do fundo, no estado inicial para j=0 e no estado final para j=n	[kg]
H ₂ O	Água	
H ₂ O _{ad}	Volume de água adicionada à amostra até à saturação	[L]
HR	Fração de humidade do solo, determinada por perda de peso na estufa	[kg H ₂ O/kg sh]
ha	hectare	
K	Potássio	
KCl	Cloreto de potássio	
LER	Lista Europeia de Resíduos	
Mg	Magnésio	
Mn	Manganês	
m _e	Massa de material adicionado, em base seca	[kg]
m _{f,j}	Massa da camada do fundo, no estado inicial para j=0 e no estado final para j=n, em base seca	[kg]
m _{H2O_v}	Massa de água para um volume igual ao volume de solo teste	[kg]
m _{i,j}	Massa de elemento químico i presente no solo da camada do meio, no estado inicial para j=0 e no estado final para j=n	[kg]
m _{m,j}	Massa da camada do meio, no estado inicial para j=0 e no estado final para j=n, em base seca	[kg]
m _{sh}	Massa de solo tal e qual	[kg]
m _{ss}	Massa de solo seco	[kg]
m _{t,j}	Massa da camada do meio, no estado inicial para j=0 e no estado final para j=n, em base seca	[kg]

Na	Sódio	
Ni	Níquel	
ND	Não detetado	
Nv	Poder neutralizante da cinza	[g CaO/100g de cinza]
P	Fósforo	
P_{eficaz}	Porosidade eficaz do solo	[L vazios circulação/L total]
P_{Total}	Porosidade total do solo	[L vazios/L total]
PI(d)	Pluviosidade diária	[mm/dia]
PI(m)	Pluviosidade média	[mm]
ppm	Partes por milhão	
Q	Quantidade de cinza a aplicar no solo	[kg cinza/ha]
$Q(H_2O)$	Quantidade de água a aplicar nas colunas	[L/dia]
R	Quantidade de CaO a aplicar no solo	[kg Nv/ha]
sh	Solo tal e qual	
s_i	Massa de elemento químico i presente no material adicionado na camada superior	[kg]
ss	Solo seco	
$t_{i,j}$	Massa de elemento químico i presente no solo da camada do topo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$	[kg]
ton	Tonelada	
tq	Solo tal e qual	
V_e	Volume de poros de circulação de água na amostra	[L]
V_r	Volume de lixiviado recolhido em cada semana do teste de lixiviação	[L]
V_s	Volume máximo de água que o solo pode reter	[L]
V_t	Volume total de amostra	[L]
V_v	Volume de vazios da amostra	[L]
$x_{fi,j}$	Fração de elemento químico i presente no solo da camada do fundo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$	[kg/kg]
$x_{mi,j}$	Fração de elemento químico i presente no solo da camada do meio, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$	[kg/kg]
x_{si}	Fração de elemento químico i presente no material adicionado na camada superior	[kg/kg]
$x_{ti,j}$	Fração de elemento químico i presente no solo da camada do topo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$	[kg/kg]
Zn	Zinco	
W_{Wss}	Razão entre a massa de água e a massa de solo seco, determinada por perda de peso na estufa	[kg H_2O /kg ss]
ρ_{H_2O}	Massa específica da água	[kg/L]
$\rho_{\text{“bulk” solo}}$	Massa específica do solo, tal e qual	[kg/L]

1. Introdução

Com o aumento da população mundial, das necessidades ao nível da produção de alimentos e da urgência em produzir alimento suficiente para a população, os campos agrícolas têm sofrido uma enorme e ininterrupta utilização. Tem conduzido à degradação dos solos, resultando em solos pobres em matéria orgânica e nutrientes. Em consequência, gerou-se um aumento no consumo mundial de fertilizantes, o que levou a um aumento no seu custo de compra e de utilização. Gera-se uma procura de novas alternativas ao nível de fertilizantes, que possam conduzir a melhores resultados que os fertilizantes tradicionais, fazendo com que o seu custo de produção possa diminuir e se tornem mais acessíveis.

Uma das alternativas que vem sendo discutida e experimentada, é a utilização de cinza de cinza resultante de processos de combustão, como substituto do fertilizante tradicional para aplicação em solos acidificados e com pouca disponibilidade de nutrientes, ou seja, solos pouco férteis.

A cinza pode ser de vários tipos no que respeita ao material combustível e ao processo que lhe deu origem. A cinza mais interessante, sob o ponto de vista da aplicação no solo, é a cinza resultante da combustão de biomassa florestal, pois é classificada como um resíduo não perigoso.

As cinzas provenientes das centrais de combustão são de dois tipos:

- i) Recolhidas na câmara de combustão primária, escória no caso da combustão em grelha, ou cinzas de fundo ("bottom ash") no caso da combustão em leito fluidizado;
- ii) Recolhidas nos diversos sistemas de despoeiramento dos gases de combustão, são as cinzas volantes ("fly ash").

As cinzas, escórias, provenientes dos sistemas de combustão em grelha possuem elevados teores de carbono não queimado. Relativamente aos sistemas de combustão em leito fluidizado, os teores de não queimados presentes nas cinzas de fundo são consideravelmente baixos, no entanto, é necessário a aplicação de técnicas de tratamento eficientes para a corrente gasosa resultante deste sistema visto que contém uma elevada quantidade de partículas.

De entre as técnicas de despoeiramento utilizadas para a remoção de partículas, nomeadamente, cinzas provenientes da combustão de biomassa, a técnica mais utilizada é a instalação de ciclones, mais eficientes na remoção de partículas grosseiras superiores a 10 mm e multi-ciclones, eficientes para partículas abaixo de 10mm. De entre os sistemas de despoeiramento existem ainda os filtros de mangas, com eficiência de cerca de 99%, e os precipitadores electrostáticos, com uma eficiência de 99% para partículas entre 0,01 µm e 100 µm (Coelho 2010).

Denota-se que estas cinzas provenientes de biomassa florestal, em especial a cinza volante, vêm ganhando interesse devido às suas características físicas e químicas, que possibilitam a sua utilização como fonte de nutrientes, com melhorias nas propriedades químicas e físicas do solo, tornando-a num valioso corretor do solo, e um possível substituto dos fertilizantes tradicionais.

O atual incentivo à utilização de recursos renováveis para a produção de energia, tem aumentado o número de centrais de produção de energia elétrica, como de outras instalações que utilizam como matéria-prima a biomassa florestal. Não havendo muitas soluções de gestão para as cinzas, o seu destino final tem sido principalmente a deposição em aterros a um custo bastante elevado.

A deposição de cinzas em aterro é desvantajosa para quem precisa de se desfazer deste tipo de resíduos e tem de pagar preços exorbitantes para o fazer e ainda para o próprio aterro, que muitas vezes não está preparado para os receber. Estes resíduos podem trazer diversos problemas de manutenção e conservação do aterro, quando manejados de forma incorreta. Ao depositar estes resíduos em aterro está a desperdiçar-se um resíduo que pode ter uma utilização bastante proveitosa.

A utilização das cinzas como adubo mineral pode ser uma forma de devolver este resíduo à natureza, ou seja, uma forma de o valorizar, sendo um caminho possível para fechar o ciclo dos nutrientes e combater a acidificação do solo (Saarsalmi et al. 2010).

Devido às suas características, a cinza apresenta um elevado potencial, não só como fertilizante do solo, mas também para o sector da construção, principalmente construção de estradas, parques de estacionamento e mesmo como material de construção no que respeita a aterros sanitários. Todas estas opções são viáveis de serem apresentadas como estratégias sustentáveis de gestão das cinzas de biomassa. Podem ser utilizadas na mistura com outros materiais de construção, principalmente o betão.

A utilização das cinzas de biomassa na construção vai proporcionar um aumento de estabilidade nos materiais e no caso da sua utilização na construção de aterros, ajuda no controlo da circulação de água no mesmo, sendo utilizadas individualmente ou como mistura de cinza e lama (Ribbing 2007).

Tal como a aplicação de cinzas no solo, também o seu uso na construção e em outras possíveis utilizações, apresentam problemas que é necessário avaliar. Um dos fatores mais limitantes para a utilização da cinza é a não existência de regras nem de valores limite, ou seja, de nenhum método de avaliação, nem de restrições, no que respeita a este processo. Urge a necessidade de criação de um método de avaliação coerente e fiável visto que, problemas como a lixiviação de metais pesados e de nutrientes em excesso para o solo, são possíveis de ocorrer.

Elementos, tal como nutrientes ou metais pesados, que se encontram presentes tanto no solo como na cinza, podem encontrar-se disponíveis para serem utilizados pelas plantas, a esta disponibilidade chama-se biodisponibilidade. A biodisponibilidade pode ser caracterizada como sendo a quantidade de um elemento químico presente no solo, disponível para interagir com os organismos vivos existentes no mesmo. É afetada por diversos fatores tal como as características do solo, o clima, e a quantidade de matéria orgânica presente no solo.

Quando produtos químicos ou agroquímicos são utilizados, acabam por chegar ao solo onde estão sujeitos a degradação, lixiviação ou mesmo absorção pelos organismos vivos. Usualmente assume-se que estes produtos químicos se encontram totalmente disponíveis para os microrganismos e para a fauna do solo através do contacto direto com os mesmos. Contudo, estudos realizados nas duas últimas décadas mostram que os elementos presentes no ambiente não estão totalmente biodisponíveis, e a sua absorção por parte dos organismos vivos é realizada em menor quantidade do que aquela que realmente existe no solo.

Embora a aplicação de cinza no solo seja uma prática ancestral, o conhecimento do fenómeno de interação entre os constituintes da cinza e a matriz do solo e a sua dinâmica mediante diferentes condições ambientais, ainda não é completo.

1.1. Motivação do trabalho

A cinza de biomassa em Portugal provém, essencialmente, da queima de biomassa utilizada na produção de calor e eletricidade, onde as tecnologias mais utilizadas passam pela combustão e gaseificação. Torna-se urgente arranjar uma estratégia de gestão para este resíduo, uma vez que está previsto para Portugal, entrarem em funcionamento num futuro próximo, novas centrais termoelétricas onde a matéria-prima utilizada será biomassa florestal. Isto levará a um aumento substancial da quantidade de cinza produzida.

Sabendo que a cinza pode ser benéfica para o solo onde é depositada, a mesma também poderá ser prejudicial devido à concentração de elementos químicos que possam estar presentes na sua constituição, tal como metais pesados. A composição da cinza não é facilmente estimada uma vez que é qualitativa e quantitativamente dependente da biomassa utilizada, e é dependente da temperatura do processo, visto ser esta temperatura que provoca a volatilização ou não dos componentes químicos presentes na biomassa (Shizuo Maeda 2007).

A prática de colocação da cinza no solo deve ser previamente estudada e analisada, e vários fatores devem ser tidos em conta, como seja o pH do solo e o pH da cinza, dois fatores determinantes para a quantidade de cinza a colocar, a quantidade de matéria orgânica presente no solo, que nos vai auxiliar no cálculo do poder neutralizante da cinza, e posteriormente, na determinação da carga a aplicar.

Com o problema do destino a dar às cinzas a torna-se cada vez mais importante, devido à enorme quantidade de cinzas produzidas, mostra-se essencial fazer um estudo que incida sobre os efeitos das cinzas no solo e na água de lixiviação, e ainda a sua influência no crescimento das plantas. Assim, surge o tema desta dissertação, e evidencia-se a importância que o trabalho experimental realizado poderá ter para este tema e o seu possível contributo para esta área de estudo.

1.2. Objetivos da investigação

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar o efeito da aplicação de cinza de biomassa num perfil de solo, determinar quais os seus efeitos positivos e negativos no e ainda discutir se esta cinza poderá ser utilizada como substituta de fertilizantes ou adubos, ou mesmo como neutralizante do solo.

Assim, optou-se por caracterizar quimicamente a amostra de cinza resultante da queima de biomassa florestal a ser utilizada no trabalho experimental, assim como o efeito da incorporação das cinzas de biomassa no solo de forma a atingir determinados objetivos específicos tais como:

- Analisar as alterações das características químicas e físicas do solo;
- Avaliar o uso de cinza de biomassa como fonte de macronutrientes disponíveis para as plantas;
- Estudar as alterações nutricionais provocadas pelo uso da cinza de biomassa;
- Observar os efeitos da cinza de biomassa sobre a lixiviação de nutrientes presentes no solo em estudo;
- Estudar a influência das cinzas no crescimento das plantas;

Desta forma poderá avaliar-se o potencial da cinza utilizada neste trabalho para o seu uso nos solos ácidos de forma a reverter esse caráter.

1.3. Enquadramento legal

No que respeita aos documentos legais de interesse para este trabalho é de referir o Decreto-lei nº 73/2011 de 17 de Julho que vem alterar a Lei-quadro dos resíduos, nomeadamente o Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de Outubro, transpondo a Diretiva nº 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro. Estabelece o Regime Geral de Gestão de resíduos e define as prioridades de gestão dos mesmos. Neste âmbito o artigo 7º deste Decreto-Lei estabelece o Princípio da hierarquia das operações de gestão dos resíduos, que estipula que a política e a legislação em matéria de resíduos devem respeitar a seguinte ordem de prioridades, no que se refere às opções de prevenção e gestão de resíduos: prevenção e redução, preparação para a reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização e, em último lugar, apenas quando nenhum dos anteriores for possível, proceder à eliminação definitiva.

A deposição de cinzas de biomassa no solo pode ser considerada como uma operação de valorização, evitando-se assim a eliminação deste resíduo através da sua deposição em aterro, o que vai ao encontro da hierarquia de gestão de resíduos, que coloca sempre a valorização antes da eliminação definitiva. Na Portaria nº 209/2004 de 3 de Março consta a Lista Europeia de Resíduos (LER), esta assegura a harmonização do normativo vigente em matéria de identificação e

classificação dos diferentes tipos de resíduos. De acordo com a LER, a cinza de biomassa proveniente de centrais termelétricas, pode ser classificadas com o código 10 01 03, neste caso cinzas volantes de combustão de madeira.

Por outro lado o Decreto-Lei nº 276/2009 de 2 de Outubro apresenta os valores limite de concentração de metais pesados para as lamas de depuração a serem aplicadas em solos agrícolas ou florestais, estabelece também os valores limite nos solos recetores e a quantidade de metais pesados que podem ser anualmente introduzidas em solos cultivados. Este Decreto-Lei transpõe a Diretiva Europeia 86/278/EC relativa à proteção do ambiente e, em especial, dos solos na utilização agrícola de lamas de depuração. É o Decreto-Lei normalmente utilizado como legislação de referência para a aplicação de cinzas no solo, uma vez que, em Portugal não existe legislação específica para a aplicação em solo agrícola ou florestal, de cinza proveniente de centrais de conversão de biomassa. Respeitar o Decreto-Lei nº 276/2009, tem como objetivo principal evitar efeitos nocivos para o homem, para a água, para os solos, para a vegetação e para os animais, promovendo a utilização correta das lamas de depuração.

Na tabela 1 são apresentados os valores limite de concentração de metais pesados nas lamas destinadas à aplicação em solo agrícola, e os valores limite para as quantidades anuais de metais pesados que podem ser introduzidas nos solos cultivados, com base numa média de 10 anos.

Tabela 1 - Valores limite de concentração de metais pesados nas lamas e de quantidades anuais que podem ser introduzidas nos solos cultivados (Decreto-Lei nº 276/2009)

Parâmetro	Valores limite na lama (mg/kg de matéria seca)	Valores limite de quantidade introduzida (kg/ha/ano)
Cádmio	20	0,15
Cobre	1000	12
Níquel	300	3
Chumbo	750	15
Zinco	2500	30
Mercúrio	16	0,1
Crómio	1000	4,5

Em seguida na tabela 2, apresentam-se os valores limite de concentração de metais pesados nos solos recetores, em função do seu pH.

Tabela 2 - Valores limite de concentração de metais pesados nos solos recetores (Decreto-Lei nº 276/2009)

Parâmetro	Valores limite (mg/kg de matéria seca)		
	pH ≤ 5,5	5,5 ≤ pH ≤ 7	pH > 7
Cádmio	1	3	4
Cobre	50	100	200
Níquel	30	75	110
Chumbo	50	300	450

Zinco	150	300	450
Mercúrio	1	1,5	2
Crómio	50	200	300

Para a análise das características do lixiviado é ainda necessário referir a legislação que estipula os valores estabelecidos para efeitos de controlo da qualidade da água para consumo humano, Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto, que estabelece o regime jurídico de qualidade da água para consumo humano. Este Decreto-Lei, que revê o Decreto-Lei nº 243/2001 de 5 de Setembro, é importante devido a que, quando o lixiviado ocorre em campo, vai infiltrar-se no solo até aos lençóis de água subterrâneos, podendo esta água ser captada para consumo humano. Os valores paramétricos estabelecidos para o controlo da qualidade da água para consumo humano, de interesse para o presente trabalho, são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Valores paramétricos para o controlo da qualidade da água para consumo humano (Decreto-Lei nº 306/2007)

Parâmetro	Valor paramétrico	Unidade
Cádmio	5	µg/l
Crómio	50	µg/l
Cobre	2	mg/l
Níquel	20	µg/l
Ferro	200	µg/l
Manganês	50	µg/l
Sódio	200	mg/l
Magnésio	50	mg/l
Cálcio	100	mg/l

Uma vez analisados os valores limite para águas destinada a consumo humano, será importante observar quais os valores limite para águas destinadas a rega, de forma a ser possível determinar se o lixiviado obtido no teste de lixiviação, se não cumprir os valores limite de água destinada a consumo humano, pode ser utilizado como água de rega. Para tal é necessário analisar o Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto, que pretende melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. Este documento legal estabelece valores máximos admissíveis para vários parâmetros apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Valores máximos admissíveis para água de rega (Decreto-Lei nº 236/98)

Parâmetro	Valor máximo admissível	Unidade
Cádmio	0,05	mg/l
Crómio	20	mg/l
Cobre	5	mg/l
Níquel	2	mg/l
Ferro	5	mg/l

Manganês	10	mg/l
Zinco	10	mg/l

1.4. Organização da Tese

A presente tese está organizada em seis capítulos. No presente e primeiro capítulo é descrita a motivação para a realização deste trabalho, os objetivos da tese, o plano de trabalho e ainda a forma como a tese está organizada no que respeita aos conteúdos a abordar.

No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte em relação à utilização da cinza de biomassa como neutralizante do solo e os seus efeitos nas características físicas e químicas do solo.

O Capítulo 3 apresenta descrita a metodologia e os métodos utilizados no trabalho experimental.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos com a realização deste trabalho e respetiva discussão.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões e pontos fundamentais da discussão feita aos resultados obtidos. São apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros a realizar no âmbito desta tese.

No capítulo 6 é apresentada a bibliografia utilizada e consultada para a realização deste trabalho.

2. Aplicação de cinza de combustão no solo

2.1. Características da cinza

As características da cinza de biomassa dependem de vários fatores, tal como o tipo de planta da qual provém e a parte da planta a ser utilizada: as folhas, as raízes ou o caule. Dependem também do tipo de resíduo a queimar: madeira, pasta de madeira ou resíduos de papel. O facto de conterem ou não outros resíduos na sua constituição, as condições de combustão, e ainda a forma como estas cinzas foram armazenadas e manuseadas, também influenciam as características das plantas.

2.1.1. Físicas

As cinzas de biomassa podem ser aplicadas no solo sob duas formas, cinza de biomassa em pó e cinza de biomassa em granulado. A cinza de biomassa caracteriza-se por ser constituída por mais de 80% das partículas com tamanho inferior a 1.0 mm, sendo que os restantes 20% ou menos, são normalmente compostos por madeira não totalmente queimada (Etiégni and Campbell 1991) citado em (Demeyer et al. 2001). Assim, a distribuição de tamanhos estimada das partículas presentes na cinza de biomassa pode variar desde a granulometria da areia grossa a da argila (Muse and Mitchell 1995) citado em (Demeyer et al. 2001).



Figura 1 - Amostras de cinza em pó e cinza em granulado

2.1.2. Químicas

2.1.2.1. Alcalinidade

A alcalinidade, ou poder neutralizante das cinzas de biomassa, é por norma muito elevada, o que provoca um aumento do pH do solo onde as cinzas são aplicadas. Tendo em conta diversos estudos realizados, considera-se que esse aumento de pH com adição de cinza de biomassa é por norma, bastante mais rápido e duradouro, comparando com o aumento de pH do solo, aquando da adição de cal. Isto explica-se com o facto de as cinzas serem bastante solúveis em água.

De acordo com Vance (1996) a cinza de biomassa apresenta um equivalente de carbonato de cálcio médio de 48.1%, alternando entre 13,2% e 92.4%, sendo estes resultados retirados de um estudo onde foram experimentadas cerca de 18 amostras de cinza diferentes. Esta característica da cinza de biomassa é bastante influenciada, principalmente pela temperatura de combustão e pelo seu armazenamento, uma vez que a alcalinidade diminui com o aumento da temperatura de combustão e com o período de armazenamento. Segundo Etiegni e Campbell (1991) os carbonatos e os bicarbonatos predominam a temperaturas abaixo dos 500° e os óxidos prevalecem a temperaturas acima de 1000°.

2.1.2.2. Macro elementos

Entre os macro elementos mais importantes e frequentemente analisados em estudos realizados utilizando cinza de biomassa, apresentam-se o azoto, o potássio, o fósforo, o cálcio e o magnésio.

Relativamente ao azoto que se encontra presente na composição da cinza, o mais habitual é que se apresente em baixas quantidade, uma vez que este é geralmente oxidado e transformado em constituintes gasosos durante a combustão. No entanto a combustão é incompleta na maior parte das vezes (Muse and Mitchell 1995) citado em (Demeyer et al. 2001). Relativamente ao potássio, observa-se que este é muito solúvel na água, o que leva a que o mesmo seja suscetível de ser eliminado do solo através da água de lixiviação (Ulery et al. 1993) citado em (Demeyer et al. 2001).

Através do estudo de diferentes tipos de cinza de biomassa conclui-se que, as cinzas provenientes da queima direta de madeira, têm valores mais elevados de macro elemento do que as cinzas provenientes da queima de papel ou pasta de papel (Demeyer et al. 2001).

2.1.2.3. Micro elementos

De entre os micro elementos normalmente analisados, o que se apresenta com valores mais elevados de concentração na cinza de biomassa é o ferro. No entanto, uma vez que as concentrações de micro elementos presentes nas cinzas serem muito variáveis, isto nem sempre se verifica. Sendo o ferro pouco solúvel em soluções ácidas, a sua reatividade em solos ácidos vai ser muito baixa (Ohno T. 1992) citado em (Demeyer et al. 2001).

Em estudos realizados por Someshwar (1996), foi desenvolvido um inventário com cerca de 26 análises a cinza de biomassa proveniente de 15 fontes diferentes. Aí observou-se que de entre os micro elementos analisados, os mais abundantes nas cinzas de biomassa eram o manganês e o zinco.

2.2. Efeito das cinzas de biomassa nas características do solo

De uma forma geral e tendo em conta tudo o que já é conhecido sobre o efeito das cinzas no solo, a sua aplicação irá estimular as atividades dos microrganismos e melhorar as propriedades químicas e físicas do solo.

2.2.1. Propriedades físicas

Os efeitos da cinza, no que respeita às propriedades físicas do solo, não são amplamente conhecidos nem facilmente determináveis, sabendo-se apenas que esta pode alterar a textura do solo. Isto deve-se à cinza de biomassa ser essencialmente composta por partículas de finas dimensões. Pode ainda influenciar a sua permeabilidade e, segundo Clapham e Zibilske (1992), gerar problemas de salinidade no solo.

Relativamente à capacidade de retenção de água no solo, observa-se que as partículas da cinza de biomassa incham em contacto com a água, o que pode provocar a obstrução dos poros de circulação de água. Como consequência isto pode aumentar o arejamento do solo e favorecer a capacidade de retenção de água. (Etiégni and Campbell 1991) citado em (Demeyer et al. 2001).

A mineralogia do solo não é muito afetada pela aplicação de cinza de biomassa, uma vez que os minerais que se encontram em maior número na composição do solo são muito solúveis, não se fixando no mesmo.

2.2.2. Propriedades químicas

A alteração das características do solo causadas pela cinza são principalmente observadas nas suas propriedades químicas. Os estudos realizados com recurso à cinza de biomassa, prendem-se essencialmente nas suas principais características, tal como terem um pH muito elevado, ou seja, serem bastante alcalinas, e conterem uma grande quantidade de elementos químicos, também eles alcalinos.

Tendo em conta a sua composição, a cinza de biomassa pode ser uma ótima fonte de micro e macro elementos, e uma forma de corrigir a carência dos mesmos no solo, bem como corrigir o seu pH.

2.2.2.1. Acidez do solo

Segundo Muse e Mitchell (1995) são vários os estudos já efetuados que mostram que a aplicação de cinza de biomassa no solo aumenta o seu pH, e ainda que a cinza de biomassa em pó tem um efeito muito mais rápido que a cinza da biomassa em granulado (Vance 1996) citado em

(Demeyer et al. 2001). A capacidade neutralizante de determinados elementos presentes na cinza, tal como os hidróxidos e carbonatos de cálcio, magnésio e potássio, são, segundo Vance (1996), uma das suas mais importantes características para atuar como corretor do solo.

A cinza de biomassa reage mais rapidamente com o solo, comparativamente ao carbonato de cálcio, resultando num aumento mais acentuado do pH mas por um período de tempo mais curto (Clapham and Zibilske 1992) citado em (Clapham and Zibilske 1992). Isto acontece uma vez que, os carbonatos e hidróxidos de potássio e sódio, que são os elementos que mais contribuem para o grande poder neutralizante da cinza de biomassa, são muito solúveis em água e não permanecem muito tempo no solo, sendo arrastados pela água de lixiviação (Ulery et al. 1993) citado em (Demeyer et al. 2001).

Ohno (1992) descobriu que o aumento do pH é mais acentuado em solo com pH muito baixo e com um teor de matéria orgânica igualmente baixo. Mostrou também que a taxa de neutralização diminui com o tempo, devido ao aumento do pH do solo, e à composição complexa das cinzas de biomassa.

2.2.2.2. Macro elementos

A cinza de biomassa pode ser considerada como uma fonte direta de macro elementos como o fósforo, o cálcio, o magnésio e, principalmente, o potássio (Ohno T. 1992) citado em (Demeyer et al. 2001). Esta pode ser assumida como um fertilizante sem azoto, uma vez que a concentração deste elemento não tende a aumentar com a aplicação de cinza, sendo particularmente adequada para solos florestais com desequilíbrios em termos de nutrientes (Clarholm 1994) citado em (Demeyer et al. 2001).

A concentração de azoto pode aumentar devido ao aumento da atividade microbiana, apesar de este não estar presente na cinza de biomassa em quantidades significativas, que poderá provocar a sua libertação através da mineralização da matéria orgânica. Num estudo realizado na Alemanha, as concentrações de azoto aumentaram em toda a profundidade do solo (Ludwig et al. 2002) citado em (Saarsalmi et al. 2010).

A disponibilidade dos vários nutrientes presentes no solo, é principalmente influenciada por fatores como, a adição de nutrientes provenientes da cinza e o aumento da atividade microbiana. Sabe-se ainda que, outro dos fatores com mais influência na disponibilidade de nutrientes provenientes da cinza de biomassa é a capacidade de absorção que o solo possui.

Resultados de testes de lixiviação realizados com diferentes frações de cinza e água ajudaram a que Khanna et al. (1994) conseguisse reagrupar os elementos solúveis nas seguintes categorias: o potássio, que é rapidamente dissolvido por ser bastante móvel, o cálcio e o magnésio, que se dissolvem mais rapidamente com a aplicação de baixas frações de cinza e água, e o fósforo, que se mantém geralmente insolúvel.

Muito importante será referir que o fósforo estará essencialmente retido nos silicatos de alumínio, ou na forma de fosfatos de alumínio pouco solúveis, segundo Ohno e Erich (1993), daí a sua concentração no solo, por norma, não aumentar.

Pode então dizer-se que a aplicação de cinza de biomassa no solo vai certamente aumentar a concentração de macro elementos no solo, mas existe sempre o risco de ocorrer uma diminuição da concentração de determinados elementos presentes no solo devido à ocorrência de lixiviação.

2.2.2.3. Micro elementos

Sabe-se que a cinza de biomassa contém grandes quantidades de micro elementos, e espera-se que a sua concentração no solo aumente com a aplicação da cinza, o que nem sempre se verifica. A explicação reside no facto de que a aplicação de cinza de biomassa no solo, numa primeira fase, reduz a solubilidade e a mobilidade de elementos como o ferro, o manganês, o zinco e o cobre, o que foi observado por Clapham e Zibilske (1992), devido ao aumento acentuado do pH (Demeyer et al. 2001). No entanto, à medida que o tempo vai passando, os micro elementos e os elementos vestigiais presentes na cinza e no solo, vão ganhando mobilidade e vão-se libertando, tornando-se disponíveis para as plantas.

Estudos levados a cabo por Zhan et al. (1994) mostraram que o cádmio e o zinco são imediatamente libertados pelas cinzas de biomassa para solos de pH igual ou inferior a 6.5, sendo que aumentos ligeiros na concentração de zinco foram observados por Ludwig, et al. (2002). Relativamente ao cádmio, Lodenius (2003) concluiu que apesar de o cádmio estar em maior quantidade no solo, este encontra-se numa forma indisponível para as plantas. Zhan et al. (1994) mostrou também que o comportamento do crómio, relativamente à sua libertação da cinza de biomassa, varia consoante a origem das cinzas de biomassa utilizadas. No caso do cobre, concluiu que este é pouco solúvel, e no caso do chumbo este mostra-se bastante insolúvel.

2.3. Efeito das cinzas de biomassa nas características das plantas

Devido à complexidade deste tema, ainda não se encontra bem documentado nem esclarecido quais são os efeitos da aplicação de cinza nas características das plantas, tendo sido observados efeitos, tanto positivos como negativos, no crescimento das mesmas.

Vários estudos já realizados, tanto em campo como em laboratório, mostram que a aplicação de cinza de biomassa nos solos, favorece, na maior parte das vezes, o crescimento das plantas. Isto foi observado em várias espécies de plantas, e ocorre através dos nutrientes que a cinza passa para o solo (Muse and Mitchell 1995) citado em (Demeyer et al. 2001). Os efeitos positivos

observados são normalmente atribuídos ao aumento da disponibilidade de potássio e fósforo no solo.

Estudos realizados por McDonald et al. (1994) basearam-se na aplicação de vários resíduos orgânicos no solo, e na análise da sua influência no crescimento de cedro vermelho. Este observou que a aplicação de cinza de biomassa por si só não afetava o crescimento das plantas, mas que combinada com um resíduo orgânico rico em nitrogénio, favorecia o seu crescimento.

Sabe-se ainda que as concentrações de fósforo, cálcio, potássio e magnésio das plantas é afetada pela adição de cinza de biomassa ao solo (Clapham and Zibilske 1992) citado em (Demeyer et al. 2001).

No caso particular do fósforo observa-se que a sua libertação para o solo e consequente absorção pelas plantas, não é particularmente favorecida pela aplicação de cinza de biomassa. Estudos realizados recorrendo à utilização de milho mostram que a cinza é menos eficiente que fertilizantes ricos em fósforo (Ohno and Erich 1993) citado em (Demeyer et al. 2001). Isto acontece possivelmente porque o fósforo presente na cinza de biomassa é pouco solúvel, e uma grande parte do fósforo presente no solo encontra-se imóvel (Erich M.S. 1991) citado em (Demeyer et al. 2001).

Relativamente a outros elementos, por exemplo o cálcio e o potássio, as suas concentrações no solo e a sua disponibilidade para as plantas aumenta com a aplicação de cinza de biomassa no solo (Ohno T. 1992) citado em (Demeyer et al. 2001).

No que respeita a micro elementos como o ferro, o manganês, o zinco e o cobre, normalmente as suas concentrações diminuem com a aplicação de cinza de biomassa uma vez que, a sua disponibilidade diminui com o aumento do pH do solo (Clapham and Zibilske 1992) citado em (Demeyer et al. 2001).

2.4. Principais problemas de aplicação

O forte aumento do pH do solo e o aumento bastante significativo da concentração de potássio, ambos provocados pela aplicação da cinza de biomassa, são os fatores mais limitantes no que respeita à deposição desta cinza no solo, ao contrário da contaminação por elementos tóxicos, que não se verifica na maior parte dos casos, tal como metais pesados e outros elementos.

Um dos objetivos principais da aplicação de cinza de biomassa no solo será, elevar o pH de solos com níveis de acidificação bastante altos, por forma a proporcionar condições favoráveis para a utilização do solo, seja solo agrícola ou solo florestal. No entanto, para que a aplicação da cinza tenha sucesso, é necessário que a quantidade aplicada não faça com que o pH do solo atinga valores muito elevados, e este se torne demasiado alcalino, o que pode ser considerado como um

dos maiores problemas e cuidados a ter aquando da sua aplicação. Se o pH do solo ficar demasiado elevado pode trazer problemas às plantas e mesmo para ao próprio solo, tão graves como os que o solo demasiado ácido provocam.

Um dos principais problemas de aplicação de cinza de biomassa em solos florestais ou agrícolas, passa pela possível presença de elementos químicos tóxicos provenientes da queima da biomassa, o que poderá ocorrer se a mesma tiver sido sujeita a um tratamento com recurso a conservantes químicos contendo metais pesados na sua composição, como acontece na madeira tratada. Desta forma na composição das cinzas podem existir pequenos resíduos desses conservantes.

Os elementos tóxicos que eventualmente se encontram na cinza de biomassa, podem provocar desequilíbrios nas relações entre os nutrientes do solo, reduzindo a disponibilidade dos nutrientes para as plantas. Sabe-se ainda que a elevação do pH, se este atingir valores próximos da neutralidade, pode levar a deficiências de nutrientes como o manganês e o zinco (Malavolta et al. 1997) citado em (Shizuo Maeda 2007). A disponibilidade de elementos como os metais pesados pode aumentar, devido a processos de mineralização que ocorrem no solo ou, como já referido anteriormente, são libertados pelas cinzas de biomassa (Brunner et al. 2004).

Outro problema de aplicação pode advir de a cinza de biomassa ser aplicada na mesma proporção em que é normalmente aplicado o óxido de cálcio no solo para fins de aumento de pH, o que não pode acontecer, uma vez que o poder neutralizante destes elementos é diferente.

A perda de vários elementos através da lixiviação, sejam micro ou macro elementos, provocada pela água das chuvas, poderá provocar a contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao local de aplicação da cinza de biomassa (Kahl et al. 1996) citado em (Demeyer et al. 2001).

2.5. Principais benefícios de aplicação

A aplicação de cinza de biomassa no solo reduz os indicadores de acidificação do solo, apresentando-se como uma solução sustentável para a reciclagem de nutrientes. A cinza de biomassa que é aplicada devolve nutrientes ao solo, tais como o potássio, o magnésio, o cálcio, entre outros, após estes terem sido removidos através de desflorestação dos terrenos, devido à necessidade de recolha de madeira para combustível.

Um dos maiores benefícios passa por, como já foi referido anteriormente, a cinza de biomassa reverter a acidificação do solo aumentando o seu pH e fechando o ciclo dos nutrientes, apresentando-se como uma forma sustentável para a deposição deste resíduo (Brunner et al. 2004).

Sabe-se também que a cinza de biomassa fornece nutrientes ao solo que se encontravam em concentrações muito baixas e insuficientes, melhorando as características do mesmo e aumentando a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

A utilização de cinza de biomassa tem a vantagem de esta atuar de forma mais rápida do que os adubos normais ou o óxido de cálcio, no que respeita ao aumento de pH e ao fornecimento de nutrientes, uma vez que as suas partículas têm tamanhos muito pequenos, infiltrando-se e reagindo mais rapidamente.

A utilização da cinza de biomassa é vista como uma alternativa económica e como um substituto de adubos minerais, ou mesmo como um suplemento desses adubos ou de adubos orgânicos, que se encontram com um preço cada vez mais elevado, sendo outro dos benefícios da sua utilização e aplicação no solo.

Passando a cinza a ser utilizada cada vez mais com os objetivos referidos anteriormente, e aplicada nos solos mais ácidos e com carência de nutrientes, uma das grandes vantagens será a diminuição crescente da sua deposição em aterro. Isto implica uma diminuição nos problemas que daí advinham, como seja a necessidade de criação de aterros próprios para este efeito, a contaminação do solo, entre outros.

3. Ensaaios experimentais

3.1. Metodologia

No presente capítulo são descritos os passos utilizados para a realização do trabalho experimental. É assim apresentado o alinhamento do trabalho experimental realizado e decidiu-se que, para controlo e monitorização eficaz dos testes laboratoriais de aplicação de cinza, carbonato de cálcio e lama no solo, se iria proceder de forma a facilitar e garantir os melhores resultados possíveis.

3.1.1. Origem do solo para o estudo

Os testes de aplicação de cinza no solo foram realizados em laboratório (do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro) usando solo recolhido num local relativamente próximo, de acesso autorizado e representativo de um dos tipos de solo da zona litoral-centro. Nesta fase do estudo, optou-se ainda por este tipo solo por ser relativamente fácil de manejar.

3.1.2. Método de recolha do solo

O método escolhido para a recolha de solo teve em conta alguns critérios tais como, obter uma amostra representativa de um perfil de solo e poder reproduzir em laboratório o que aconteceria no local. Para isso o perfil de solo recolhido não pode estar perturbado, devendo estar o mais similar possível ao solo que encontramos no campo. Optou-se por limpar a parte superior do solo, antes da recolha, uma vez que se a aplicação fosse realizada no local, o procedimento teria de ser também esse para a cinza poder penetrar na camada superior do solo de forma a surtir os efeitos desejados com a aplicação da mesma.

3.1.3. Ensaaios experimentais

Os ensaios experimentais levados a cabo, foram planeados de forma a testar o efeito da aplicação de cinza no solo, quando este é sujeito à ação da precipitação (procurando reproduzir as condições que ocorrem na natureza), no que diz respeito ao efeito de calagem e à mobilização de elementos químicos. Desta forma, realizaram-se quatro tipos de ensaios experimentais, para avaliar o efeito da cinza no solo relativamente a solo sem cinza (referência), solo com correção de pH, (adição de um agente de calagem) e solo enriquecido em matéria orgânica. Os ensaios foram divididos conforme se apresenta na tabela 5.

Tabela 5 - Descrição dos ensaios efetuados em laboratório

Ensaio	Tipo de aplicação	Réplica
#1	Solo referência	1
#2		2
#3	Cinza	1
#4		2
#5	Carbonato de cálcio	1
#8		2
#6	Cinza + Lama	1
#7		2

Efetuaram-se duas réplicas em cada ensaio para ser possível tecer algum tipo de consideração relativamente ao grau de confiança dos resultados.

Os parâmetros determinados neste trabalho experimental foram vários, havendo alguns que só foram determinados para o solo e outros apenas para a cinza, como é descrito mais à frente neste capítulo. Essa escolha de parâmetros foi feita de acordo com a análise de estudos presentes na bibliografia da especialidade, com a necessidade de analisar diferentes pontos importantes para a concretização dos objetivos propostos no presente estudo. Assim, foi analisado o solo inicial e final utilizado nos ensaios experimentais, o lixiviado proveniente da aplicação de água no solo, a cinza e a lama utilizadas na aplicação no solo.

3.1.4. Procedimentos analíticos

Os procedimentos analíticos foram escolhidos consoante os parâmetros necessários à realização deste trabalho. A escolha dos procedimentos e métodos foi baseada em normas tais como as CEN/TS, as normas europeias (EN) e em normas internacionais (ISO), sendo que algumas delas sofreram pequenas alterações ao longo da realização do trabalho, de forma a se adaptarem melhor aos objetivos do mesmo. Os procedimentos utilizados serão enunciados e descritos sucintamente mais à frente.

3.2. Materiais e métodos

Este ponto do trabalho é de extrema importância, visto que nele vai ser descrito o local de estudo escolhido para a recolha de amostras, o método de recolha do solo utilizado, os ensaios experimentais realizados e os procedimentos analíticos escolhidos.

3.2.1. Local de estudo

O local escolhido para a recolha do solo alvo de estudo em laboratório localiza-se na freguesia de Vilamar, conselho de Cantanhede, situado na Região Litoral-Centro de Portugal Continental, com uma área estimada de 6,20 km² e uma média de 780 habitantes (2011). Esta freguesia localiza-se sensivelmente a 35 km de distância da cidade de Aveiro, 13 km do Oceano Atlântico e 11 km de Cantanhede. Escolheu-se este local principalmente por ter sido obtida autorização do proprietário do terreno para o acesso ao mesmo e recolha de amostras. Na figura 2 apresenta-se a localização geográfica do local de amostragem.

A recolha dos perfis de solo foi realizada numa área de terreno sem cultivo, onde predominavam espécies de ervas e arbustos nascidos devido a este terreno não ser utilizado para a agricultura nos últimos anos. O tipo de solo predominante na zona de estudo é do tipo arenoso. Este solo é caracterizado por nele predominar areia fina, ser bastante permeável e por se encontrar numa zona relativamente plana à cota 58m.

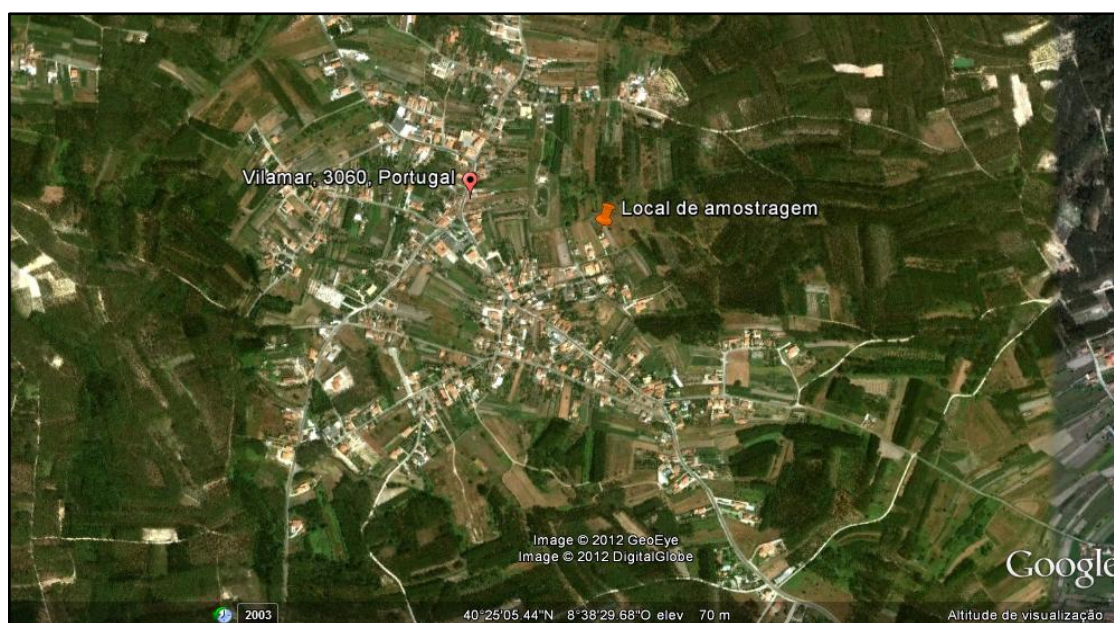


Figura 2 - Localização geográfica do local de amostragem

Pela análise da distribuição dos solos em Portugal, observa-se que o solo da zona de estudo pertence aos solos Podzois. Estes solos são caracterizados por serem solos ácidos, cuja evolução é condicionada pela presença de um húmus, caracterizado por mineralização lenta de matéria orgânica fresca. São ainda característicos de florestas resinosas (Atlas de Portugal).

3.2.2. Método de recolha do solo

A obtenção dos perfis de solo é das partes mais importantes neste tipo de trabalho uma vez que tudo o que se fizer posteriormente será influenciado pela forma como o solo foi recolhido, refletindo-se nos resultados experimentais. Para o trabalho ser bem-sucedido, parte-se do princípio que os perfis de solo recolhidos são representativos da área de estudo.

Para tal escolhe-se o local do terreno onde se vai realizar a recolha de solo, passando-se então à limpeza do local escolhido, que consiste em eliminar toda a vegetação, assim como a manta morta, e ainda o máximo de raízes possível, que se encontre na parte superior do solo a recolher.

Após o solo estar o mais limpo possível, procede-se à recolha dos perfis. Foram recolhidos perfis com três tamanhos diferentes: i) os que foram utilizados para os ensaios de aplicação de cinza no solo, sendo estes os perfis com maior dimensão; ii) os perfis utilizados na realização do teste de crescimento de plantas; e iii) os perfis mais pequenos, utilizados para o estudo das características do solo propriamente ditas. Para o efeito foram utilizados tubos com as seguintes dimensões: cerca de 29 cm de altura e 14 cm de diâmetro, outro com 25 cm de altura e 12 cm de diâmetro e o mais pequeno com cerca de 22 cm de altura e 6 cm de diâmetro. Enterraram-se os tubos no solo e retiraram-se os mesmos trazendo os perfis de solo inalterados, com o maior cuidado possível para que os perfis não fossem comprometidos.

A figura 3 apresenta como foi realizado o processo de recolha dos diversos perfis de solo recolhidos e utilizados no trabalho experimental em laboratório.



Figura 3 - Processo de recolha dos perfis de solo

O material necessário para realizar a amostragem foi o seguinte:

- Pá de jardinagem grande;
- Pás de jardinagens pequenas;
- Enxada;
- Martelo;
- Luvas;
- Tubos de plástico;
- Caixote de transporte;
- Chapas de suporte;
- Sacos plásticos.

3.2.3. Ensaios experimentais

Relativamente aos ensaios experimentais realizados, apresenta-se nas subsecções seguintes os aspetos mais relevantes, que dizem respeito aos materiais - cinza e solo - à montagem experimental, à tipologia de ensaios realizados - lixiviação e fitotoxicidade - e aos parâmetros analisados.

3.2.3.1. Cinza de biomassa

A cinza que serviu ao presente estudo é uma cinza volante, proveniente de uma central bioelétrica de caldeira de leito fluidizado, operando com biomassa residual de abate de eucalipto (casca e ramagem). A cinza utilizada consistiu numa amostra composta por material recolhido mensalmente entre Janeiro e Novembro de 2011, nos equipamentos de despoeiramento de gases (economizador e precipitador electrostático). A granulometria da cinza foi determinada utilizando o equipamento Coulter Laser LS 230, capaz de medir granulometrias na gama de 0,04-2000 μm . Foi fornecida para o propósito da presente tese. Na figura 4 apresenta-se a análise granulométrica da cinza de biomassa utilizada.

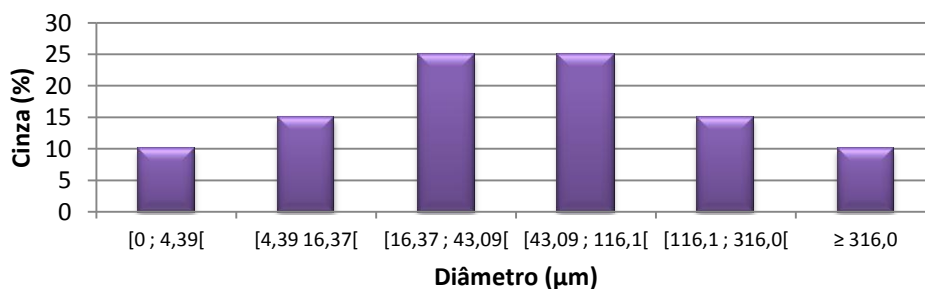


Figura 4 - Granulometria da cinza de biomassa

3.2.3.2. Perfil de solo

Realizaram-se os ensaios experimentais com o perfil de solo inalterado, uma vez que um dos objetivos do trabalho é conseguir demonstrar em laboratório o que aconteceria no terreno propriamente dito, com a aplicação de cinza no solo e quais os efeitos dessa mesma aplicação. Assim a recolha dos perfis foi realizada com o maior cuidado possível, por forma a não danificar a integridade do solo, sabendo que recolher o perfil não perturbado é uma tarefa bastante difícil. Os perfis de solo foram colocados em colunas de vidro acrílico com uma altura de cerca de 29 cm e um diâmetro de 14 cm, apresentando-se na figura 5 um exemplo das colunas já com o perfil colocado.



Figura 5 - Perfil de solo inalterado nas colunas

A caracterização do perfil de solo, antes e após os testes em coluna, foi realizada dividindo o perfil de solo em três partes: topo, meio e fundo. Esta estratégia é importante para estudar a influência da aplicação de cinza nas propriedades do solo em profundidade, uma vez que, apesar de a cinza ser aplicada na camada superior do solo, a água das chuvas é responsável pelo transporte dos seus elementos constituintes para as diferentes camadas do solo abaixo da superfície. Dessa forma pode perceber-se como a cinza influencia os parâmetros analisados nas diferentes camadas, no intervalo de tempo em que decorreu o ensaio experimental.

3.2.3.3. Montagem das colunas para os testes de lixiviação

Foram utilizadas 8 colunas para o estudo da aplicação de cinza no solo, tendo cada uma delas, aproximadamente, o mesmo volume de solo. A montagem foi feita com o intuito de que todos os ensaios se realizassem nas mesmas condições, de temperatura (ambiente), humidade e luminosidade. A montagem laboratorial teve por finalidade permitir a realização dos ensaios previstos na metodologia, de aplicação de cinza no solo em diferentes condições, como se pode observar na figura 5 e se ilustra no esquema da figura 6.

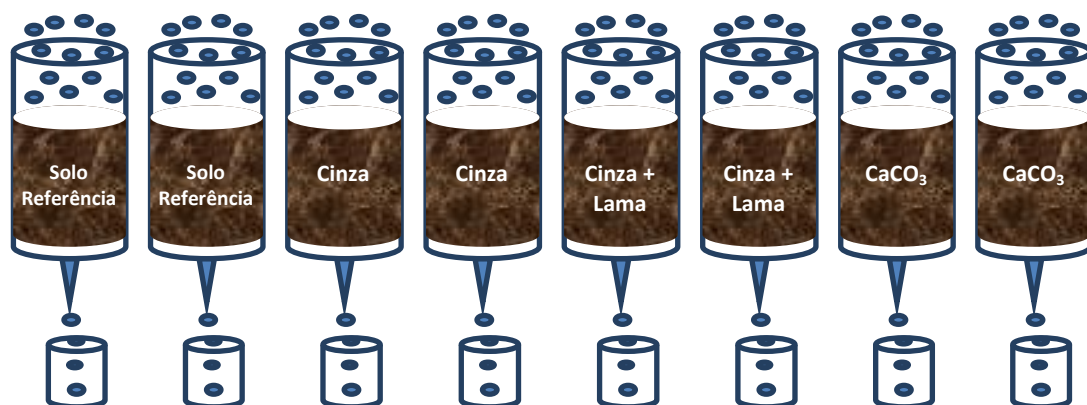


Figura 6 - Montagem laboratorial das colunas

Em todas as colunas, o solo assenta numa malha de aço inox que permite filtrar a água lixiviante, que depois é acumulada numa câmara na base da coluna. Todas as colunas possuem uma abertura na parte inferior para ser possível a recolha de lixiviado acumulado e com origem na aplicação de água na parte superior do solo.

O teste de lixiviação consistiu na aplicação da mesma quantidade de água na parte superior de cada coluna, para que esta fosse absorvida pelo solo e recolhendo-se o lixiviado num recipiente colocado por baixo da respetiva coluna. O lixiviado recolhido foi de imediato sujeito à medição de pH e de condutividade. Seguidamente foi acidificado a pH 2 utilizando ácido sulfúrico e preservado no frigorífico.

A água escolhida para aplicar no solo foi água destilada, com pH controlado próximo dos 5,8. A aplicação da água foi feita todos os dias ou de dois em dois dias, conforme a disponibilidade. A água foi espalhada aos poucos sobre o solo, na parte superior de cada coluna, de forma que o solo não ficasse encharcado em demasia e conseguisse absorver a água lentamente.

A quantidade de água aplicada em cada coluna foi determinada com base na pluviosidade média da região de Aveiro, utilizando o Plano da bacia hidrográfica do Rio Vouga, e com os dados do reator.

Pela observação das isolinhas da carta de precipitação média anual para a zona de Aveiro, determinou-se que esta zona se encontrava entre a linha de 1000 mm e a linha de 1100 mm para os 12 meses do ano, sendo que o valor assumido para a realização dos nossos cálculos foi de 1000

mm para os 12 meses do ano. Tendo em conta que os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro são os meses mais quentes do ano e com menos precipitação, decidiu-se realizar os cálculos tendo apenas em conta os restantes 8 meses, ou seja, 243 dias do ano.

Com uma pluviosidade média de 1000 mm e recorrendo aos 243 dias do ano considerados, determinou-se a pluviosidade diária pela equação 1.

$$Pl(d) = \frac{Pl(m)}{D(ano)} \quad \text{Equação 1}$$

Com,

Pl(d) – Pluviosidade diária, mm/dia

Pl(m) – Pluviosidade média, mm

D(ano) – Dias do ano considerados para o cálculo da pluviosidade diária, dia

Obtendo-se uma pluviosidade diária de 4,115 mm por dia. Sabendo que a área da secção transversal de cada coluna é de 0,015386 m², então a quantidade de água aplicada é dada pela equação 2.

$$Q(H_2O) = Pl(d) \times At \quad \text{Equação 2}$$

Com,

Q(H₂O) – Quantidade de água a aplicar, dm³/dia

Pl(d) – Pluviosidade diária, mm/dia

At – Área da secção transversal da coluna, m²

Desta forma obtém-se uma quantidade de água a aplicar de 63,3 dm³ por dia, o que é igual a 63,3 ml/dia. Arredondou-se este valor para 65 ml por dia ou 130 ml por cada dois dias, quando não foi possível a aplicação diária.

A recolha do lixiviado foi realizada, aproximadamente, de dois em dois dias, para se recolher um volume suficiente para a determinação dos parâmetros anteriormente referidos, preferencialmente, são necessários mais de 100 ml de lixiviado.

Ao longo do período do teste de lixiviação foi-se recolhendo o lixiviado e analisando os parâmetros à frente descritos, sendo que para parâmetros como o pH e condutividade as análises foram realizadas sempre que havia recolha de lixiviado, e para os restantes as análises foram efetuadas semanalmente.

3.2.3.4. Parâmetros analisados

Os parâmetros analisados neste trabalho foram escolhidos, tendo em conta trabalhos realizados por outros autores e presentes na bibliografia da especialidade, e consoante os objetivos desta tese.

Na tabela 6 são apresentados todos os parâmetros determinados aquando a realização deste trabalho e para que amostra foram determinados, se para o solo, o lixiviado a lama ou a cinza.

Tabela 6 - Parâmetros escolhidos para análise

	Solo	Lixiviado	Cinza	Lama
Humidade	X	-	-	X
Porosidade (total e eficaz)	X	-	-	-
Densidade aparente	X	-	-	-
Capacidade de retenção específica	X	-	-	-
Capacidade de campo	X	-	-	-
pH	X	X	X	X
Condutividade	X	X	X	-
Poder neutralizante	-	-	X	-
Fósforo	X	X	X	X
Nitratos	X	X	X	X
Matéria orgânica	X	-	-	X
Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Cr	X	X	X	X

3.2.3.5. Teste de fitotoxicidade

O teste de fitotoxicidade foi realizado com o objetivo de determinar o eventual efeito de fitotoxicidade no crescimento das plantas, resultante da aplicação no solo de: cinza de biomassa, lama e CaCO_3 . Para tal recorreu-se à utilização de vasos com tamanhos iguais nos quais se colocou perfis de solo com a mesma altura, realizando-se três réplicas para testar cada aplicação, incluindo um branco. Esta aplicação foi feita na superfície do solo e na proporção utilizada nos testes de lixiviação em coluna. Os vasos foram regados diariamente com pequenas quantidades de água até ser atingida a capacidade de campo, o que durou cerca de uma semana. A sementeira foi de 2,5 g por vaso, de *Lolium multifolium*, espécie de crescimento rápido vulgarmente utilizada para avaliar o grau de fitotoxicidade de composto. O teste teve a duração de 15 dias, durante os quais se regaram os vasos apenas com a quantidade de água suficiente para manter o topo do solo húmido, de forma que as sementes pudessem germinar. Após este período procedeu-se ao corte da relva, o mais junto à raiz possível. Levou-se à estufa em recipientes secos até peso constante e efetuou-se a pesagem da biomassa (relva) seca.

3.2.4. Procedimentos analíticos

3.2.4.1. Determinação da capacidade de campo

A capacidade de campo de um solo é a quantidade de água retida pelo solo, após ter sido drenado o excesso de água gravitacional, e após ter diminuído bastante a velocidade do movimento descendente da água, ou seja, é a capacidade máxima que um solo tem de reter água nos seus capilares, contra a ação da gravidade.

O valor da capacidade de campo de um solo está relacionado com as propriedades físicas do mesmo, como seja a densidade e a porosidade. Para a sua determinação é necessário realizar diferentes passos que se descrevem nas alíneas abaixo.

Para o efeito é necessário colocar um perfil de solo numa coluna, como ilustra a figura 7.



Figura 7 - Esquema da coluna com perfil de solo para a determinação da capacidade de campo

i) Determinação da fração de humidade do solo

Para a determinação do teor de humidade do solo inicial, utilizou-se uma amostra retirada nas mesmas condições das amostras utilizadas para a realização dos ensaios de aplicação de cinza, sendo esta amostra destruída para ser levada à estufa, não sendo utilizada para mais nenhuma análise.

O procedimento utilizado para esta determinação seguiu a norma ISO 11465:1993, que se baseia na secagem em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até peso constante não excedendo as 24 horas.

ii) Densidade aparente

A densidade aparente, D_A , que é a relação entre a massa do solo seco, m_{ss} , e a massa de igual volume de água, $m_{H_2O_V}$, é calculada pela equação 3.

$$D_A = \frac{m_{ss}}{m_{H_2O_V}} \quad \text{Equação 3}$$

Com,

D_A – densidade aparente do solo, kg ss/kg H_2O

$m_{H_2O_V}$ – massa de água para um volume igual ao volume de solo do teste, kg

m_{ss} – massa de solo seco, kg ss

Sendo que, a massa de solo seco é dada pela equação 4, onde a massa de solo tal e qual é designada por m_{sh} .

$$m_{ss} = m_{sh} \times (1 - HR) \quad \text{Equação 4}$$

Com,

m_{ss} – massa de solo seco, kg ss

m_{sh} – massa de solo tal e qual (tq), kg tq

HR – fração de humidade do solo, kg H_2O /kg tq

iii) Porosidade total

Para a determinação da porosidade total utiliza-se uma amostra de solo tal e qual, à qual se vai adicionar água lentamente, de forma a proporcionar a infiltração da mesma no solo até que este fique saturado. A saturação do solo é facilmente observável na parte superior do mesmo. O volume de água adicionado até o solo atingir a saturação, H_2O_{ad} , juntamente com o volume de água já presente no solo tal e qual, corresponde ao volume total de vazios, V_v , em litros de água. Considerando a massa específica da água (ρ_{H_2O}) igual a 1 kg/dm³, o volume de vazios vem calculado pela equação 5.

$$V_v = \frac{(m_{sh} - m_{ss})}{\rho_{H_2O}} + H_2O_{ad} \quad \text{Equação 5}$$

A porosidade total, P_{total} , é calculada pela equação 6.

$$P_{total} = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Equação 6}$$

Com,

P_{total} – porosidade total do solo, L vazios/L total

V_v – volume total de vazios da amostra, L

V_t – volume total de amostra, L

m_{ss} – massa de solo seco (ss) da amostra, kg ss

m_{sh} – massa de solo tal e qual (tq) da amostra, kg tq

H_2O_{ad} – volume de água adicionada à amostra até à saturação, L

ρ_{H_2O} – massa específica da água, kg/L

iv) Porosidade Eficaz

Após a determinação da porosidade total, expor a amostra de solo à força da gravidade (2 a 3 dias), deixando sair a água que o solo não retém, através do orifício na base da coluna da figura 6. A água que não ficar retida no solo corresponde ao volume de poros disponíveis para a circulação de água, V_e . A porosidade eficaz, P_{eficaz} , é calculada pela equação 7.

$$P_{eficaz} = \frac{V_e}{V_t} \quad \text{Equação 7}$$

Com,

P_{eficaz} – porosidade eficaz do solo, L vazios de circulação/L total

V_e – volume de poros de circulação de água na amostra, L

V_t – volume total de amostra, L

v) Capacidade de retenção específica

Para a amostra exposta à força da gravidade, como foi anteriormente descrito, a água que fica retida no solo, corresponde ao volume máximo de água que o solo pode reter sendo dada pela equação 8.

$$V_s = V_t - V_e \quad \text{Equação 8}$$

E assim a capacidade de retenção específica, C_{RE} , é dada pela equação 9.

$$C_{RE} = \frac{V_s}{V_t} \quad \text{Equação 9}$$

Com,

C_{RE} – capacidade de retenção específica, L água retida/L total

V_s – volume máximo de água que o solo pode reter, L

V_t – volume total de amostra, L

vi) Capacidade de campo

A capacidade de campo é a correspondência entre o máximo de massa de água que o solo pode reter, m_{VS} , e a massa de solo seco, m_{SS} . A capacidade de campo é dada pela equação 10.

$$CC = \frac{V_s}{m_{SS}} \times \rho_{H_2O} \quad \text{Equação 10}$$

Com,

CC – capacidade de campo, kg água/kg ss

V_s – volume máximo de água que o solo pode reter, L

m_{SS} – massa de solo seco, kg

ρ_{H_2O} – massa específica da água, kg/L

3.2.4.2. Preparação das amostras

Para a preparação das amostras de solo foi necessário realizar diversos passos a seguir descritos. Inicialmente secou-se o perfil de solo ao ar durante cerca de 15 dias, para tal, dividiu-se o mesmo em três partes: topo, meio e fundo. De seguida espalhou-se o solo por recipientes devidamente identificados e deixados a descoberto, em contacto com o ar, efetuando-se pesagens regulares. Quando o peso dos recipientes deixou de variar, assumiu-se que o solo já se encontrava seco, dando-se por terminada a secagem ao ar.

Após as amostras estarem secas, foi necessário homogeneizá-las, sendo de seguida passadas por um crivo de 2 mm. A crivagem do solo foi efetuada visto que, para a determinação dos parâmetros de interesse, todas as amostras de solo devem estar crivadas a 2mm e a fração a utilizar será a menor ou igual a este diâmetro. A homogeneização é necessária de forma a garantir que a fração de solo a analisar se encontra bem representada, aquando de utilização de uma pequena porção para as análises posteriores.

3.2.4.3. Determinação do pH

Na determinação do pH das diferentes amostras, seguiu-se a norma ISO 10390:2005 (E), utilizando-se o aparelho Denver Instrument model 25 pH/ion meter.

Princípio

Para determinar o pH do solo, é realizada uma extração em H₂O ou uma extração numa solução de KCl, de solo seco ao ar, sendo a razão entre solo e a fase líquida de 1:5 (v/v). Esta suspensão é levada a agitação durante cerca de uma hora, repousando no mínimo uma hora após a agitação. Posteriormente o pH é medido através de um medidor de pH previamente calibrado com soluções padrão.

3.2.4.4. Determinação da condutividade

Para a determinação da condutividade das diferentes amostras seguiu-se a norma ISO 11265:1994 (E), utilizando-se o aparelho Multiplayer parameter analyser Consort C861.

Princípio

Para determinar a condutividade do solo é realizada uma extração em H₂O, de solo seco ao ar, numa razão de 1:5 (g/cm³), de forma a dissolver os eletrólitos. A suspensão é levada à agitação durante cerca de trinta minutos, e em seguida é filtrada. É então medida a condutividade do filtrado.

3.2.4.5. Análise Granulométrica

Foi realizada uma análise granulométrica ao solo inicial, tendo em conta que a maior parte dele estaria num intervalo de granulometria abaixo de 2mm. Escolheu-se uma escala de crivagem entre 2mm e 0,09mm de acordo com os crivos existente no laboratório do Departamento de Ambiente e Ordenamento. Os crivos escolhidos para a realização da análise granulométrica através do seu diâmetro em milímetros, foram os seguintes: 2.0, 1.4, 1.0, 0.710, 0.500, 0.355, 0.250, 0.180, 0.125, 0.090.

3.2.4.6. Determinação do poder neutralizante da cinza

Determinou-se o poder neutralizante da cinza recorrendo à norma Europeia EN 12945, “Liming materials – Determination of neutralizing value – Titrimetric methods”.

Princípio

A amostra de cinza é passada por um crivo de 250 µm e dissolvida numa determinada quantidade de ácido clorídrico. Esta solução é aquecida para que a amostra de cinza seja totalmente dissolvida. Posteriormente arrefece-se a amostra à temperatura ambiente e adiciona-se uma pequena porção de peróxido de hidrogénio. Em seguida filtra-se a amostra e realiza-se uma titulação do filtrado, com hidróxido de sódio padronizado, para determinar o ácido clorídrico remanescente.

3.2.4.7. Determinação da carga de cinza a aplicar no solo

Na determinação da quantidade de cinza a aplicar no solo recorreu-se à Especificação Técnica CEN/TS 15084, “Liming materials – Guide to the determination of the lime requirement”.

Para a determinação da carga de cinza a aplicar foi necessário determinar a matéria orgânica presente no solo e o pH do mesmo. Através desses dados, e recorrendo às tabelas 7 e 8, que se encontram presentes na Especificação Técnica anteriormente referida, foi possível classificar o solo com a classe C – solo ótimo, e determinar a quantidade de óxido de cálcio a adicionar ao solo, R.

A quantidade de cinza a aplicar no solo foi determinada através da equação 11.

$$Q = \frac{R \times 100}{N_v} \quad \text{Equação 11}$$

Com,

Q – Quantidade de cinza a aplicar no solo, kg cinza/ha

R – Quantidade de CaO a aplicar no solo, kg N_v/ha

N_v – Poder neutralizante da cinza, g CaO/100g cinza

Tabela 7 - Classificação do solo utilizado para a realização dos ensaios experimentais

pH class soil state of lime	Description of status and target	Requirement of liming materials and fertilizers
A very low	Status: Extreme restriction of soil structure and nutrient availability, very high lime requirement, significant losses of yield of almost all crops up to total loss of yield, extreme increase in plant availability of elements which become increasingly harmful as their plant availability increases at low pH Target: Achievement of targeted, optimal soil reaction; Liming has the highest priority above all other fertilizing and cultivating measures	Basal liming
B low	Status: Optimal conditions for soil structure and nutrient availability are not yet achieved, high lime requirement, still significant losses of yield with crops with a high lime demand, still high plant availability of elements which become increasingly harmful as their plant availability increases at low pH Target: Achievement of targeted, optimal soil reaction; liming within crop rotation, preferably prior to crops with a high lime requirement	Improvement liming
C optimum	Status: Optimal condition for soil structure and nutrient availability is given, low liming requirement, low respectively no increased yield by liming, but stable yield on this pH value Target: Preservation of lime condition by appropriate liming of crops with a high lime demand during crop rotation. The annual proton production has to be neutralized by preservation liming	Preservation liming
D high	Status: Lime supply is higher than targeted, no lime requirement Target: Slow decrease of soil reaction by refrain from liming	No liming
E very high	Status: Soil reaction is much higher than targeted and may have a negative influence on nutrient availability Target: Refrain from any liming	No liming

Tabela 8 - Valores utilizados para a determinação da quantidade de CaO a aplicar no solo

Parameter			Organic matter content % (mass fraction)				
Soil group	Soil	pH class pH _{KCl}	<4	4,1 to 8,0	8,1 to 15,0	15,1 to 30,0	>30
1	Sand	pH class C kg NV/ha	5,4 to 5,8 600	5,0 to 5,4 500	4,7 to 5,1 400	4,3 to 4,7 300	-
2	Slightly loamy sand	pH class C kg NV/ha	5,8 to 6,3 1 200	5,4 to 5,9 900	5,0 to 5,5 800	4,6 to 5,1 400	-
3	Heavy loamy sand	pH class C kg NV/ha	6,1 to 6,7 1 400	5,6 to 6,2 1 200	5,2 to 5,8 1 000	4,8 to 5,4 500	-
4	Sandy silty loam	pH class C kg NV/ha	6,3 to 7,0 ^a 1 700	5,8 to 6,5 1 500	5,4 to 6,1 1 300	5,0 to 5,7 600	-
5	Clayey loam clay	pH class C kg NV/ha	6,4 to 7,2 ^a 2 000	5,9 to 6,7 1 800	5,5 to 6,3 1 600	5,1 to 5,9 700	-
6	Peat	pH class C kg NV/ha	-	-	-	-	4,3 to 4,7 300

^a in the case of free carbonates (free lime) no preservation liming

3.2.4.8. Determinação da matéria orgânica através dos sólidos voláteis

A determinação da matéria orgânica presente na amostra foi realizada recorrendo ao Protocolo ASTM D1102-84 do Standard Test Method for Ash in Wood, para determinação dos sólidos voláteis.

Princípio

Uma amostra de cerca de 2 a 3 gramas de solo é calcinada na mufla a 600°C durante duas horas.

Uma vez que este método apresenta um problema de interferências que sobreavaliam a matéria orgânica, devido à oxidação de elementos presentes no solo, optou-se por determinar a matéria orgânica através do carbono orgânico, pelo método a seguir descrito. Pode-se, desta forma, determinar os valores de matéria orgânica presente no solo com mais certeza.

3.2.4.9. Determinação da matéria orgânica através do carbono orgânico

Em alternativa à determinação da matéria orgânica pelos sólidos voláteis, procedeu-se à sua determinação através do carbono orgânico, recorrendo-se à Norma Internacional ISO 14235:1998 (E).

Princípio

O carbono orgânico presente no solo a analisar é oxidado numa mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico a uma temperatura de 135°C. Os iões de dicromato são reduzidos a iões de Cr^{3+} . A intensidade destes iões é medida através de espectrofotometria. Este método é calibrado usando glucose. Através do carbono orgânico determina-se a quantidade de matéria orgânica presente no solo.

3.2.4.10. Extração aquosa para posteriores testes ecotoxicológicos

A norma seguida para a realização da extração aquosa foi a norma internacional ISO/TS 21268-2: 2007 (E).

Princípio

Este método baseia-se na suposição de que, o equilíbrio ou quase equilíbrio entre as fases líquida e sólida, é atingido durante o período do teste. A amostra é colocada em contacto com água, que contem uma baixa concentração (0,001 M) de cloreto de cálcio, e sob agitação durante cerca de vinte e quatro horas. O resíduo sólido é posteriormente separado do líquido por centrifugação. O processo de separação é bastante importante podendo influenciar fortemente os resultados do teste. Após a separação, as propriedades do eluato são medidas utilizando métodos desenvolvidos para análises de soluções aquosas. Imediatamente após a extração, os parâmetros condutividade e pH devem ser medidos.

3.2.4.11. Extração de Mehlich III

Este método de extração foi desenvolvido por Mehlich (1984) para se conseguir uma extração de vários elementos, tais como o fósforo, o potássio, o cálcio, o magnésio, o sódio, o cobre o zinco o manganês o ferro, entre outros, sendo este método utilizado para quantificar os elementos biodisponíveis.

A solução de extração Mehlich III é composta por fluoreto de amónio, ácido etilenodiamino tetra-acético, ácido acético, ácido nítrico e nitrato de amónio. A extração é realizada utilizando uma porção de amostra previamente crivada a 2 mm, que é colocada num recipiente ao qual se adiciona a solução de extração Mehlich III. De seguida é agitada durante cerca de 5 min (120 oscilações/min) e filtrada para análises posteriores.

3.2.4.12. Determinação de nitratos em solução

Para a determinação dos nitratos recorreu-se ao método 4500-NO₃ B. Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method, do Standard Methods.

Princípio

Este método só deve ser utilizado quando as amostras a analisar contém um baixo teor de matéria orgânica uma vez que, o comprimento de onda ao qual se realiza a leitura, 220 nm, para além de absorver nitratos também absorve matéria orgânica. Desta forma deve ser medida a absorção de ultravioleta nos comprimentos de onda de 220 nm e 275 nm, visto que, no comprimento de onda 275 nm não são medidos nitratos. É então necessário estabelecer um fator de correção que será, subtrair, ao valor obtido para 220 nm, duas vezes o valor a 275 nm. A quantificação dos nitratos de uma amostra é feita por comparação com uma reta de calibração em NO₃⁻.

3.2.4.13. Determinação do fósforo em solução

O método utilizado na determinação do fósforo foi o Protocolo 4500-P E. Ascorbic Acid Method do Standard Methods.

Princípio

O molibdato de amónio e o tartarato de potássio reagem em meio ácido com os ortofosfatos e o ácido resultante dessa reação é reduzido a uma intensa cor azul pelo ácido ascórbico. A quantificação do fósforo de uma amostra é feita por comparação com uma reta de calibração em fosfato.

3.2.4.14. Determinação de metais em solução

Na determinação dos metais recorreu-se ao protocolo 3111 B. 3do Standard Methods para análise por espectrofotometria de emissão e de absorção atômica de chama. Realizou-se a preparação de padrões combinados, optando-se por preparar um padrão para o cádmio, crômio, níquel, cobre e zinco, e outro para o cálcio, magnésio, manganês, potássio, sódio e ferro.

Através da absorção atômica foi determinado o cálcio, o magnésio, o manganês, o ferro, o cádmio, o crômio, o zinco, o cobre e o níquel, através do método de emissão atômica foi analisado o sódio e o potássio.

Para as extrações realizadas com o método de Mehlich, para a determinação do cálcio, magnésio, sódio e potássio, para além de se seguir o protocolo do Standard Methods, foi necessária uma adição de cloreto de cério de forma a eliminar as interferências da solução de Mehlich III.

4.Resultados

Ao longo do presente capítulo são apresentados os resultados obtidos na caracterização dos materiais e nos ensaios de aplicação de cinza no solo.

4.1. Caracterização dos materiais iniciais

Neste ponto do trabalho são apresentadas as características de interesse dos materiais utilizados: a cinza de biomassa, o solo e a lama de depuração do efluente da produção de pasta de papel.

4.1.1. Cinza de biomassa

Para a caracterização da cinza de biomassa foram determinados vários parâmetros, de entre eles os mais importantes são o pH, a condutividade e o poder neutralizante. O poder neutralizante foi necessário para determinar a carga de cinza de biomassa a aplicar no perfil de solo. Foram ainda determinados os elementos químicos de interesse para este trabalho.

4.1.1.1. Condutividade e pH

O pH foi determinado recorrendo à realização de dois tipos de extrações diferentes: um com água destilada e outro com cloreto de potássio. A condutividade foi determinada realizando-se uma extrações aquosa. Os valores obtidos para o pH e a condutividade são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Valores de pH e de condutividade obtidos no extrato aquoso de cinza de biomassa

pH (H ₂ O)	pH (KCl)	Condutividade (mS/cm)
12,5	12,6	11,79

O valor de pH determinado com a extração aquosa e o valor determinado através da extração com cloreto de potássio são bastante elevados o que indica que a cinza é fortemente alcalina, como era esperado. A este nível de pH os dois tipos de extrações não conduzem a resultados expressivamente diferentes.

4.1.1.2. Poder neutralizante e quantidade a aplicar

Para a determinação do poder neutralizante da cinza, foram realizadas três réplicas sendo por isso realizadas três titulações. Os gráficos obtidos na determinação do poder neutralizante da cinza são apresentados no anexo A. Os valores obtidos para o poder neutralizante da cinza, expresso como óxido de cálcio, encontram-se na tabela 10 e as suas unidades são apresentadas em gramas

de óxido de cálcio por cem gramas de cinza, tendo sido calculado segundo a norma Europeia EN 12945, “Liming materials – Determination of neutralizing value – Titrimetric methods.

Tabela 10 - Valores obtidos para o poder neutralizante da cinza de biomassa

Réplica	N _v (g CaO/100g cinza)
#1	41,6
#2	41,1
#3	41,7

Como é possível observar nos resultados obtidos, o poder neutralizante da cinza de biomassa corresponde a 42 gramas de óxido de cálcio por 100 gramas de cinza, ou seja, 2,4 g de cinza tem o mesmo poder neutralizante que 1 g de óxido de cálcio.

Após o cálculo do poder neutralizante é possível determinar a carga de cinza e de agente neutralizante (óxido de cálcio ou carbonato de cálcio) a adicionar ao perfil de solo nas colunas experimentais. Assim, é necessário determinar a área da secção transversal das colunas e a quantidade de matéria orgânica presente no solo e o pH do mesmo. Com estes valores, considerando o nosso solo como classe C, solo ótimo, e recorrendo à Especificação Técnica CEN/TS 15084, “Liming materials – Guide to the determination of the lime requirement”, obtém-se as massas apresentadas na tabela 11, para a realização do teste de lixiviação.

Tabela 11 - Quantidade de cinza de biomassa e óxido de cálcio, ou carbonato de cálcio, a adicionar ao solo

Amostra	m _{necessária} (g/coluna)
CaO	0,69
CaCO ₃	1,2
Cinza	1,6

4.1.1.3. Elementos químicos

Na cinza, foi determinado o conjunto de elementos químicos extraíveis, conforme descrito no capítulo 3, para os dois tipos de extração, aquosa e de Mehlich. Obtiveram-se os valores apresentados nas tabelas 12 e 13 que se encontram nas unidades miligrama por quilograma (mg/kg), ou seja partes por milhão (ppm).

Tabela 12 - Valores de metais pesados obtidos nos extratos de cinza de biomassa (ppm)

Amostra	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Cr
Cinza_ extração aquosa	ND	ND	ND	2,2E-02	4,1E-02	ND
Cinza_ extração Mehlich	1,7E+02	3,7	10	41	0,83	3,4

Nota: ND – não detetado

Tabela 13 - Valores de Nitratos, P, Ca, Mg, Na, K e Fe obtidos nos extratos de cinza de biomassa (ppm)

Amostra	Nitratos	P	Ca	Mg	Na	K	Fe
Cinza_ extração aquosa	14	0,62	2,1E+03	1,1	8,4E+02	4,41E+03	0,68
Cinza_ extração Mehlich	-	3,3	4,6E+04	2,7E+03	3,5E+03	3,8E+03	2,8E+02

Como é possível observar, de uma forma geral, com a extração de Mehlich III as concentrações obtidas são mais elevadas e alguns elementos só são detetados através desta extração não aparecendo na extração aquosa. Pela análise dos resultados observa-se que os elementos mais abundantes na cinza de biomassa utilizada são o cálcio, o sódio e o potássio, os elementos com menor concentração são o níquel, o cádmio e o crómio.

Ao comparar os valores obtidos com os valores limite presentes no Decreto-Lei nº 276/2009 para a colocação de lamas em solos florestais e agrícolas, observa-se que, em ambas as extrações e para os metais pesados níquel, cobre, zinco, cádmio e crómio, estes se encontram abaixo desses valores limite de 300, 1000, 2500, 20 e 1000 ppm, respetivamente.

4.1.2. Lama

A lama utilizada proveio da mesma indústria das cinzas de biomassa utilizadas, nomeadamente, uma fábrica de produção de pasta de papel. A lama é caracterizada por ser uma lama de mistura de lamas primárias e lamas secundárias do tratamento de efluentes da produção de pasta para papel.. Para a lama foi determinado o pH, a humidade, a matéria orgânica e ainda vários elementos químicos de interesse na realização deste trabalho.

4.1.2.1. Humidade e pH

O pH da lama foi determinado com recurso a dois tipos de extração: aquosa ou com uma solução de cloreto de potássio. A humidade da lama foi determinada de forma a calcular a quantidade de lama a adicionar às colunas de lixiviação, em base seca. Os valores de pH e de humidade são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Valores de pH obtidos para a lama utilizada

pH (H ₂ O)	pH (KCl)	Humidade (%)
8,4	7,3	65

A massa de lama a colocar nas colunas foi determinada tendo em conta que, o que se pretendia era que esta massa, em base seca, fosse igual à massa de cinza calculada anteriormente, de modo a serem adicionadas na mesma proporção. Assim, com recurso ao valor obtido para a humidade da lama, concluiu-se que a massa de lama, em base tal e qual, a adicionar era de 4,76 g/coluna.

Uma vez que a lama utilizada apresenta uma humidade de cerca de 65%, a quantidade de lama tal e qual a adicionar é bastante maior que a quantidade de cinza de biomassa e de carbonato de cálcio.

4.1.2.2. Matéria orgânica

Para a determinação da matéria orgânica presente na lama utilizada, recorreu-se ao método dos sólidos suspensos voláteis, através do Protocolo ASTM D1102-84 do Standard Test Method for Ash in Wood. A percentagem de matéria orgânica, em base seca, obtida para a lama foi de cerca de 22%. Verifica-se que a lama apresenta uma percentagem de matéria orgânica baixa comparativamente ao habitual para as lamas de mistura. Sendo que habitualmente, as lamas de mistura são compostas por cerca de 35% de matéria orgânica, a lama utilizada apresenta-se com uma percentagem abaixo do que seria esperado.

4.1.2.3. Elementos químicos

Para a lama foram determinados os mesmos elementos químicos determinados para a cinza, referidos no capítulo anterior, mas apenas por extração aquosa. Os valores são apresentados em partes por milhão (ppm) nas tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Valores de metais pesados obtidos no extrato aquoso da lama (ppm)

Nitratos	P	Ca	Mg	Na	K	Fe
9,3E+02	14	2,1E+03	53	1,4E+03	1,2E+02	5,8

Tabela 16 - Valores de Nitratos, P, Ca, Mg, Na, K e Fe obtidos no extrato aquoso da lama (ppm)

Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Cr
8,7	ND	ND	ND	ND	ND

Nota: ND – não detetado

Observa-se que os metais pesados, níquel, cobre, zinco, cádmio e crómio não são detetados, logo, não ultrapassam os valores limite estabelecidos no Decreto-Lei nº 276/2009, para as lamas a aplicar em solos agrícolas e florestais. Os elementos presentes na lama com concentrações mais elevadas são o cálcio, o sódio e os nitratos.

4.1.3. Água para o teste de lixiviação

Para o teste de lixiviação, com o intuito de recriar o que aconteceria no campo com a água da chuva, foi utilizada água destilada proveniente das instalações do Departamento de Ambiente e Ordenamento. Optou-se pela utilização de água destilada uma vez que esta não terá na sua

composição elementos químicos, em quantidades que possam contaminar o solo, e influenciar as concentrações desses elementos nas análises realizadas aos perfis de solo onde essa água foi aplicada.

Para garantir que a água não era aplicada com um pH demasiado alto, o que é característico da água destilada, esta foi arejada durante algum tempo com agitação, de forma que o seu pH baixasse para valores próximos de 5,8. Só após a água se encontrar nessas condições é que se procedeu à colocação da mesma nas colunas de lixiviação. Esta adição da água foi realizada com o maior cuidado possível, de forma que a superfície do perfil não ficasse alagada, colocando em flutuação os materiais adicionados.

4.1.4. Solo inicial

Para a análise do solo inicial, determinaram-se vários parâmetros, entre eles o pH, a condutividade, a matéria orgânica, vários elementos químicos de interesse, a humidade do solo, a capacidade de campo, entre outros. Foi ainda realizada uma análise granulométrica ao solo inicial. Todas estas análises ao solo inicial foram realizadas às três camadas em que foi dividido o perfil de solo: topo, meio e fundo.

4.1.4.1. Condutividade e pH

O pH foi determinado recorrendo a duas extrações, uma aquosa e outra com uma solução de cloreto de potássio. A condutividade foi determinada através de uma extração aquosa, seguindo a norma referida no capítulo anterior. Os valores são apresentados na tabela 17.

Tabela 17 - Valores de pH obtidos para o solo inicial

Camada	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	Condutividade (μS/cm)
Cima	5,5	4,2	30
Meio	5,5	4,4	50
Fundo	5,5	4,4	20

Como se pode observar pelos resultados obtido para o pH, quando se realiza a extração aquosa os valores obtidos são mais elevados que os valores obtidos com a extração recorrendo ao cloreto de potássio. Entre as diferentes extrações observando-se uma diferença de cerca de um valor. A condutividade é mais elevada na camada do meio sendo que a camada do fundo é a que apresenta valores de condutividade mais reduzidos.

4.1.4.2. Matéria orgânica

Foram utilizados dois métodos diferentes para determinar a matéria orgânica presente no solo inicial: o método dos sólidos suspensos voláteis, através do Protocolo ASTM D1102-84 do Standard Test Method for Ash in Wood, e o método do carbono orgânico, através da Norma Internacional ISO 14235:1998 (E). Os valores de matéria orgânica obtidos em ambos os métodos são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 - Valores obtidos para a fração mássica de matéria orgânica presente no solo inicial

Camada	Sólidos voláteis	Carbono orgânico
Matéria orgânica (% bs ¹)		
Topo	3,3	2,8
Meio	2,9	3,4
Fundo	2,4	2,8

¹ bs: base seca

Através dos resultados obtidos observa-se que, a matéria orgânica presente no solo é bastante reduzida, em todas as camadas e por ambos os métodos. Se fizermos uma média destes valores, obtemos uma percentagem de matéria orgânica de cerca de 2,8% de matéria orgânica, para o perfil de solo. Pode então concluir-se que este solo aparenta ser bastante pobre no que diz respeito à quantidade de matéria orgânica, mostrando ser um solo não muito produtivo e conclui-se que este fator não terá muita influência nos resultados obtidos no teste de lixiviação.

4.1.4.3. Análise granulométrica

A análise granulométrica do solo inicial foi realizada após este ter sido seco ao ar durante alguns dias, até a sua massa deixar de variar. Foram escolhidos dez crivos com os diâmetros descritos no capítulo anterior, tendo sido determinada a percentagem de solo para os diferentes diâmetros. A análise granulométrica é apresentada na figura 8, para as três camadas em que o perfil de solo foi dividido.

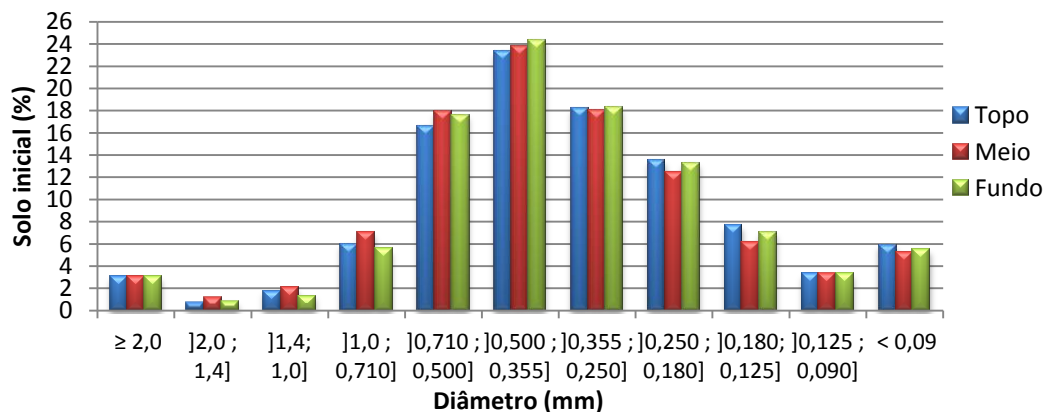


Figura 8 - Análise granulométrica do solo inicial

Na figura anterior observa-se que a maior parte do solo se encontra entre os diâmetros 0,500 mm e 0,355 mm e que a menor quantidade de solo se encontra entre os diâmetros 2,0 mm e 1,4 mm. Desta análise de granulometria pode concluir-se que, o solo utilizado no presente trabalho é um solo com características semelhantes às da areia comum, uma vez que, a granulometria da areia se encontra entre 2 mm e 0,06 mm (Wikipedia).

4.1.4.4. Humidade e capacidade de campo

Na determinação da humidade e capacidade de campo do solo, foram também determinados outros valores como o de densidade aparente, porosidade total, porosidade eficaz, capacidade de retenção específica e a densidade bulk do solo. Para esta análise recorreu-se a um perfil de solo recolhido da mesma forma que os perfis inseridos nas colunas de lixiviação. Neste solo foram realizados os métodos referidos no capítulo anterior para a determinação dos diferentes parâmetros já mencionados. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 19 para o perfil de solo.

Tabela 19 - Valores obtidos na caracterização do solo inicial

Humidade (% HR)	Densidade_ aparente	Porosidade _total (v/v)	Porosidade _eficaz (v/v)	Capacidade_ retenção específica (v/v)	Capacidade Campo [kg H ₂ O/kg ss]	ρ “bulk” solo [kg/L]	W_{Wss} [kg H ₂ O/ kg ss]_após CC
14	1,7	0,36	0,07	0,30	0,19	1,5	0,23

Ao analisar os resultados anteriores observa-se que, o solo inicial tem uma porosidade eficaz bastante baixa, ou seja, este solo possui uma fração muito pequena disponível para a circulação de água. Relativamente à porosidade total, o valor obtido para o solo é de 36% (v/v), o que representa os espaços vazios do solo. No que respeita à densidade aparente do solo, esta deverá ser inversamente proporcional à porosidade do mesmo, o que se verifica neste caso, uma vez que o solo apresenta uma densidade aparente elevada e uma porosidade relativamente baixa. A capacidade de retenção específica do solo pode ser considerada elevada, sendo cerca de 30%. Relativamente à capacidade e campo, que corresponde à quantidade máxima de água que um solo pode reter contra as forças gravitacionais, obtém-se o valor de 0,19 kgH₂O/kg ss.

4.1.4.5. Elementos químicos

Os elementos químicos analisados foram os apresentados na tabela 6, e foram obtidos através de dois métodos de extração, a extração aquosa e a extração de Mehlich III. Os valores obtidos para a extração aquosa são apresentados nas tabelas seguintes, tabelas 20 e 21, as concentrações são apresentadas nas unidades ppm.

Tabela 20 - Valores obtidos de Nitratos, P, Ca, Mg, Na, K e Fe para o solo inicial pela extração aquosa (ppm)

	Nitratos	P	Ca	Mg	Na	K	Fe
Topo	27	1,0	9,2E+02	12	13	16	0,68
Meio	39	0,65	8,6E+02	9,0	59	9,2	0,51
Fundo	17	0,64	8,4E+02	6,6	18	14	0,68

Tabela 21 - Valores obtidos de metais pesados para o solo inicial pela extração aquosa (ppm)

	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Cr
Topo	1,1	ND	0,65	1,5	ND	2,0
Meio	1,7	ND	0,023	1,2	1,7E-02	ND
Fundo	1,8	ND	ND	0,78	4,1E-02	ND

Nota: ND – não detetado

Os valores obtidos através da extração de Mehlich são apresentados nas tabelas seguintes, tabelas 22 e 23 nas unidades ppm.

Tabela 22 - Valores obtidos de P, Ca, Mg, Na, K e Fe para o solo inicial pela extração de Mehlich (ppm)

	P	Ca	Mg	Na	K	Fe
Topo	1,3	3,6E+02	30	1,5E+03	31	3,3E+02
Meio	1,9	4,3E+02	27	1,4E+03	1,9E+02	4,1E+02
Fundo	2,1	3,0E+02	22	1,3E+03	25	4,4E+02

Tabela 23 - Valores obtidos de metais pesados para o solo inicial pela extração de Mehlich (ppm)

	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Cr
Topo	2,2	ND	8,7	1,3	0,18	0,12
Meio	2,0	0,036	8,7	1,5	0,27	0,12
Fundo	4,3	ND	10	1,8	8,0E-02	0,12

Nota: ND – não detetado

Pela análise dos resultados apresentados nas quatro tabelas anteriores, pode observar-se que, na sua generalidade, os valores obtidos aquando da realização da extração de Mehlich são maiores que os valores obtidos através da extração aquosa, à exceção do cálcio, que apresenta uma concentração bastante maior através da extração aquosa. Isto pode dever-se ao facto de a extração de Mehlich ser mais eficiente, conseguindo extrair uma quantidade maior de determinados elementos, ao contrário da extração aquosa. É possível concluir que os valores obtidos para os metais pesados níquel, cobre, zinco, cádmio e crómio não ultrapassam os valores

limite estabelecidos no Decreto-Lei nº 276/2009 para solos recetores de lamas com pH igual ou inferior a 5,50.

4.2. Teste de lixiviação

O teste de lixiviação teve uma duração de cinquenta dias para as oito colunas utilizadas, o que perfaz um total de 7 semanas. Com a realização deste teste foi possível recolher amostras de lixiviado e amostras de solo que, posteriormente, foram submetidas a análise. As análises realizadas tiveram como objetivo determinar, qual a influência da adição de água de lixiviação nas colunas no lixiviado recolhido e no perfil de solo, e qual a influência da adição de cinza de biomassa, carbonato de cálcio e lama no lixiviado recolhido e no perfil de solo.

4.2.1. Caracterização do lixiviado

Para o lixiviado foram determinados parâmetros de interesse tal como o pH, a condutividade e a concentração dos elementos químicos apresentados na tabela 6. Durante o teste de lixiviação recolheram-se amostras de lixiviado que foram analisadas no próprio dia para o pH e a condutividade, e semanalmente para os elementos químicos de interesse.

4.2.1.1. Condutividade e pH

A condutividade e o pH das amostras de lixiviado foram determinados imediatamente a seguir à recolha das amostras, realizada através da abertura da parte inferior das colunas. A medição destes parâmetros foi realizada de imediato de forma a não existir o risco de contaminação, principalmente no pH, que após duas horas começa a sofrer alterações notórias. As análises foram realizadas às oito colunas e os resultados obtidos para o pH, à esquerda, e para a condutividade, à direita, são apresentados na figura 9 pela seguinte ordem: coluna com solo de referência, réplica #1 e réplica #2, coluna com cinza + lama, réplica #1 e réplica #2, coluna com cinza, réplica #1 e réplica #2, e coluna com CaCO_3 , réplica #1 e réplica #2.

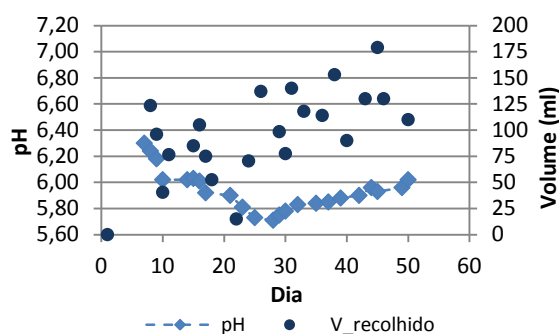


Ilustração 1) - Valores de pH obtidos para o lixiviado da coluna solo de referência, réplica #1

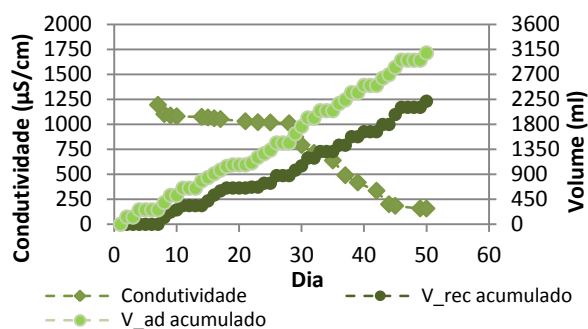


Ilustração 2) - Valores de condutividade obtidos para o lixiviado da coluna solo de referência, réplica #1

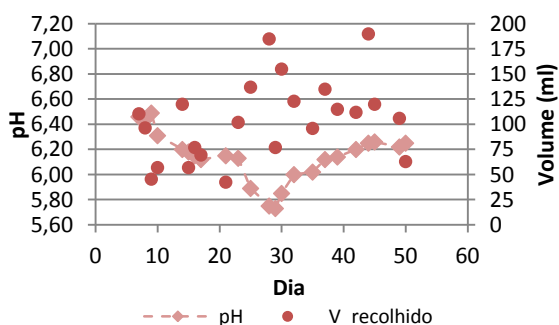


Ilustração 3) - Valores de pH obtidos para o lixiviado da coluna solo de referência, réplica #2

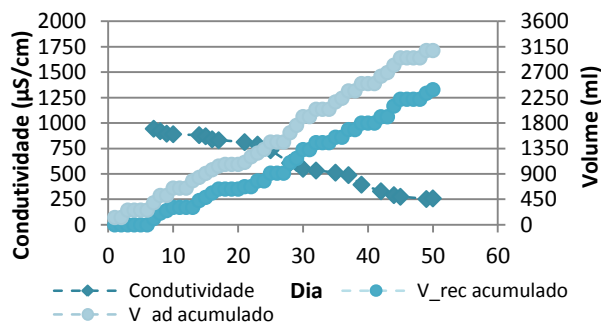


Ilustração 4) - Valores de Condutividade obtidos para o lixiviado da coluna solo de referência, réplica #2

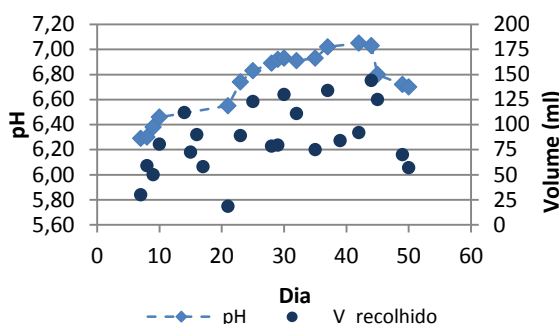


Ilustração 5) - Valores obtidos de pH para o lixiviado da coluna cinza, réplica #1

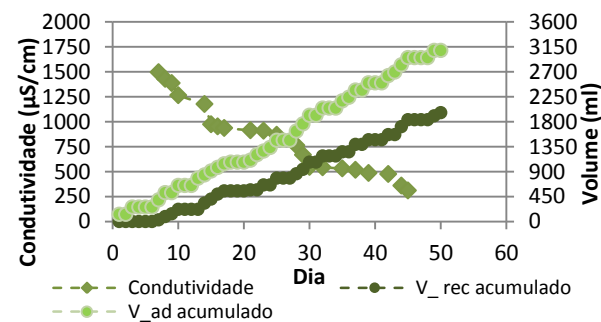


Ilustração 6) - Valores obtidos de condutividade para o lixiviado da coluna cinza, réplica #1

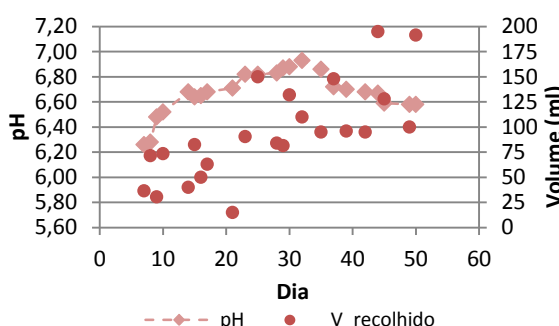


Ilustração 7) - Valores obtidos de pH para o lixiviado da coluna cinza, réplica #2

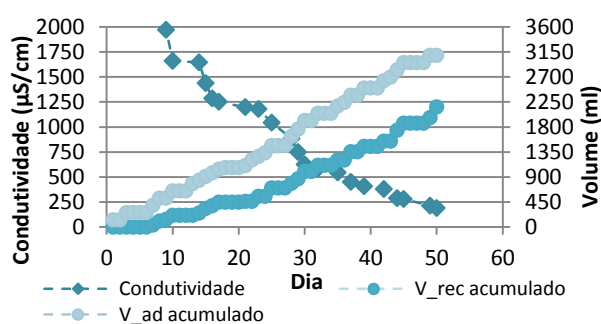


Ilustração 8) - Valores obtidos de condutividade para o lixiviado da coluna cinza, réplica #2

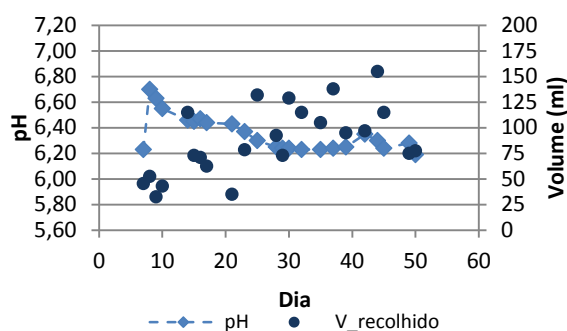


Ilustração 9) - Valores obtidos de pH para o lixiviado da coluna CaCO_3 , réplica #1

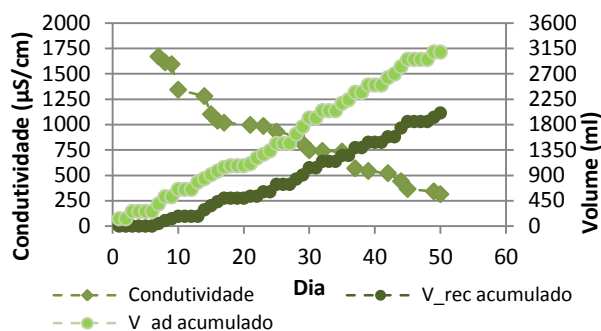


Ilustração 10) - Valores obtidos de condutividade para o lixiviado da coluna CaCO_3 , réplica #1

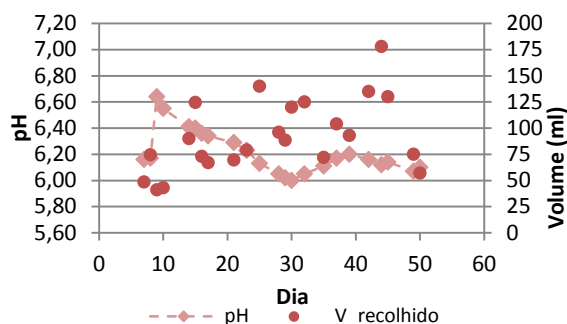


Ilustração 11) - Valores obtidos de pH para o lixiviado da coluna CaCO_3 , réplica #2

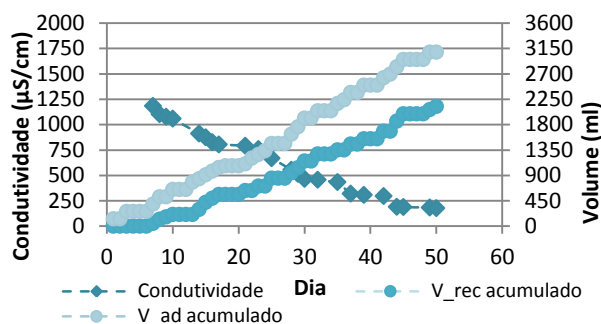


Ilustração 12) - Valores obtidos de condutividade para o lixiviado da coluna CaCO_3 , réplica #2

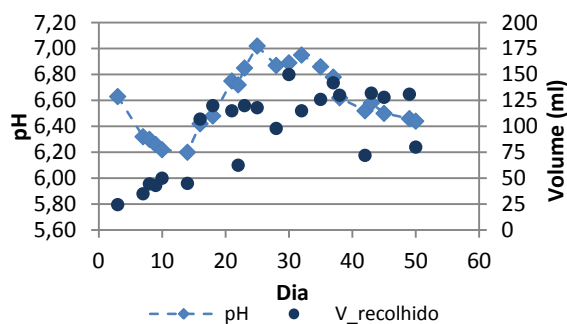


Ilustração 13) - Valores de pH obtidos para o lixiviado da coluna cinza + lama, réplica #1

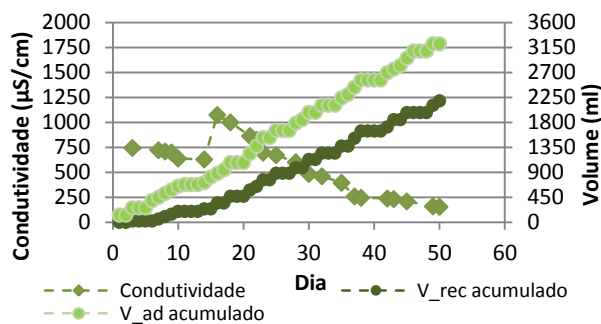


Ilustração 14) - Valores de condutividade obtidos para a coluna cinza + lama, réplica #1

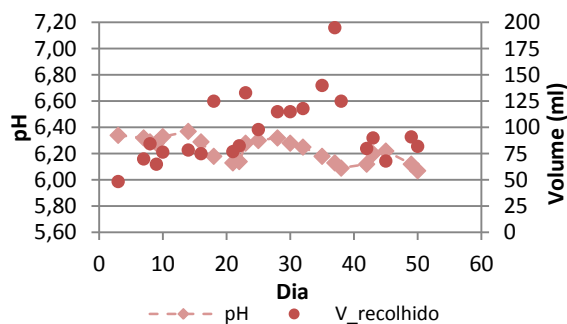


Ilustração 15) - Valores obtidos de pH para o lixiviado da coluna cinza + lama, réplica #2

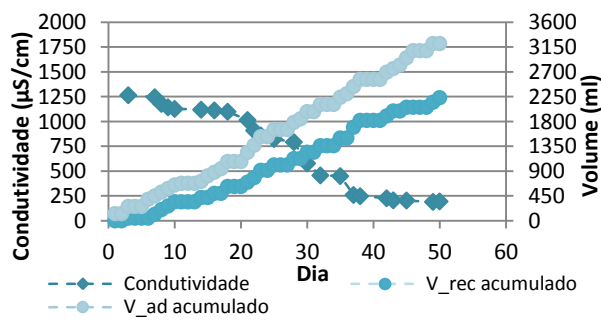


Ilustração 16) - Valores obtidos de condutividade para o lixiviado da coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 9 - Valores obtidos de pH e condutividade para o lixiviado das oito colunas de lixiviação: réplicas #1 e #2 de solo de referência, cinza, cinza + lama e CaCO_3

Ao observar os gráficos da figura 9 conclui-se que, como era esperado, a cinza tem uma grande influência no pH, provocando o seu aumento gradual e ficando cada vez mais estável ao fim do tempo do teste de lixiviação, estabilizando em valores de pH perto dos 6,60. Para o solo de referência observa-se uma diminuição gradual do pH que chega a atingir valores bastante baixos, próximos dos 5,70, para ambas as réplicas. No entanto após essa diminuição, observa-se um pequeno aumento gradual, e no fim dos 50 dias do teste de lixiviação estabiliza, em ambas as réplicas, perto dos 6,10. Para ambas as colunas de lixiviação onde se aplicou CaCO_3 , observa-se um aumento repentino do pH perto do dia 10, seguido de uma diminuição gradual dos valores de pH, estabilizando perto de 6,10. Relativamente à coluna com cinza e lama, não se verifica uma concordância dos valores de pH para ambas as réplicas. No caso da réplica #1 o pH atinge valores acima dos 7,00 e sofre bastantes variações, e para a réplica #2 mantém-se constante entre valores de cerca de 6,00 e 6,40. É de salientar que ambas as réplicas se encontraram nas mesmas condições ao longo do teste de lixiviação.

No que diz respeito à condutividade, observa-se uma diminuição gradual ao longo do teste de lixiviação, com exceção da réplica #1 da coluna cinza + lama. Os primeiros valores de condutividade medidos para todas as amostras de lixiviado não se mostram coincidentes entre as réplicas #1 e #2 das colunas de lixiviação, não se observando uma grande influência dos materiais adicionados na condutividade do lixiviado. Para todas as réplicas se verifica uma diferença de cerca de 1 Litro entre a quantidade de lixiviado acumulado recolhido e a quantidade de água adicionada acumulada, no final do teste de lixiviação. Esta diferença pode dever-se a perdas que ocorram por evaporação, por saída de lixiviado por locais não devidamente isolados da coluna, por perdas de lixiviado aquando da própria recolha, entre outros motivos.

4.2.1.2. Elementos químicos

Para o lixiviado foram analisados os elementos químicos apresentados na tabela 6. O lixiviado foi previamente acidificado, com ácido sulfúrico, por forma a poder ser reservado durante algum tempo no frigorífico sem ocorrer a degradação das amostras. A acidificação foi também realizada visto que, para algumas análises foi necessário que as amostras se encontrassem ácidas.

Fósforo

Na figura 10 são apresentados os resultados de fósforo obtidos para o lixiviado nas oito colunas de lixiviação, durante as 7 semanas do teste de lixiviação. Os resultados são apresentados em concentração, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste.

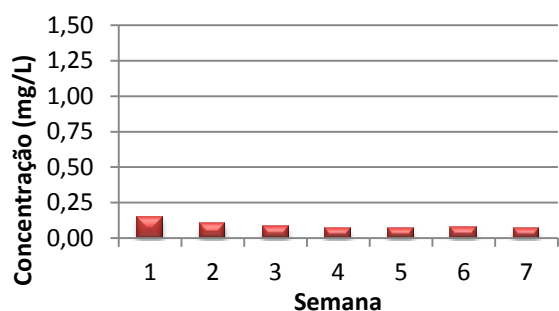


Ilustração 17) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

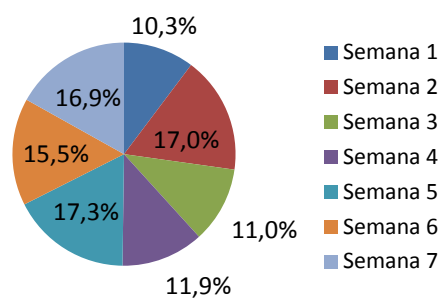


Ilustração 18) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

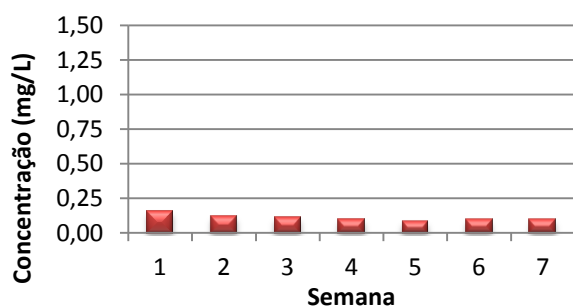


Ilustração 19) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

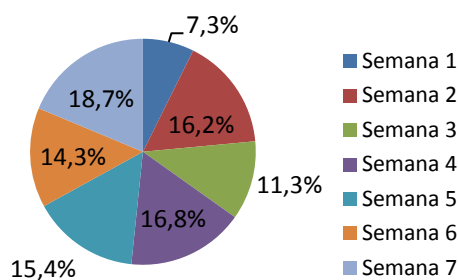


Ilustração 20) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

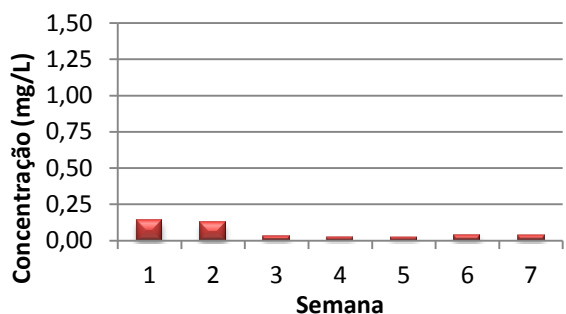


Ilustração 21) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

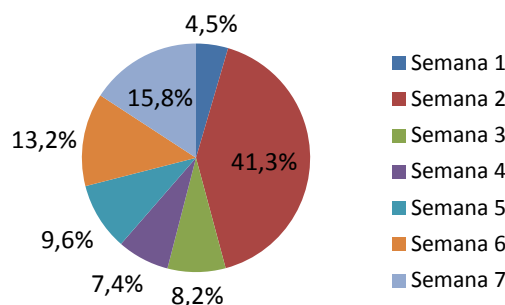


Ilustração 22) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

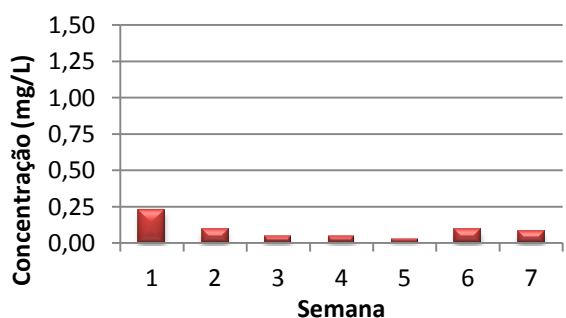


Ilustração 23) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

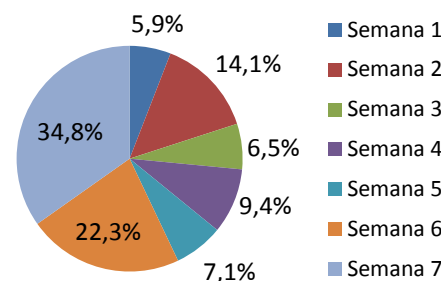


Ilustração 24) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

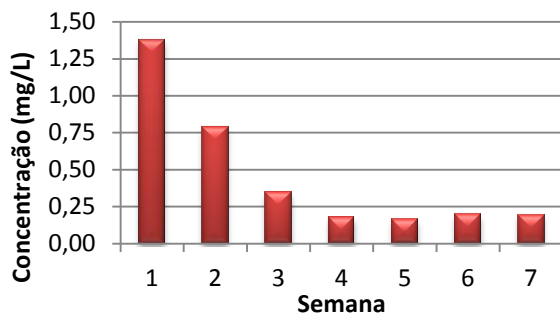


Ilustração 25) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #1

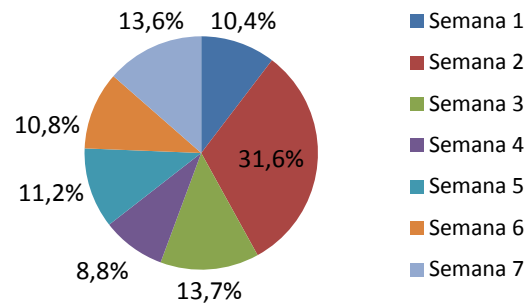


Ilustração 26) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #1

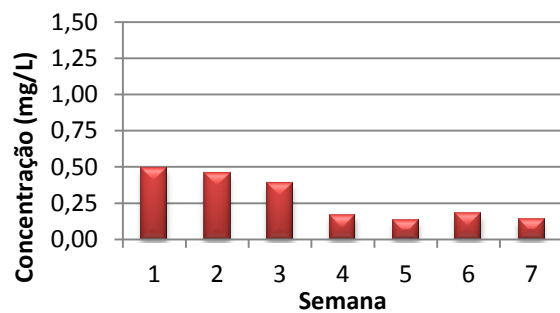


Ilustração 27) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #2

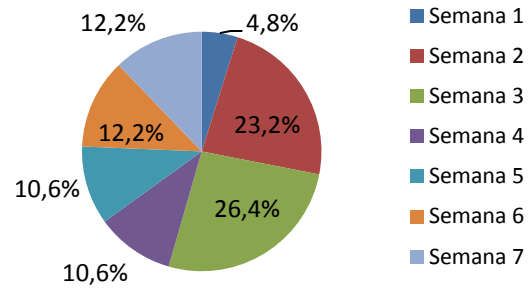


Ilustração 28) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #2

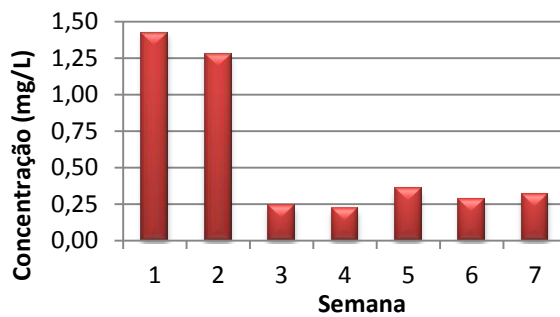


Ilustração 29) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

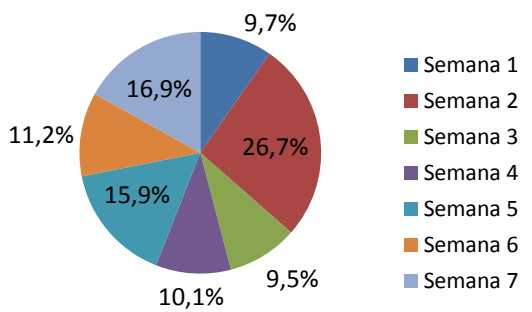


Ilustração 30) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

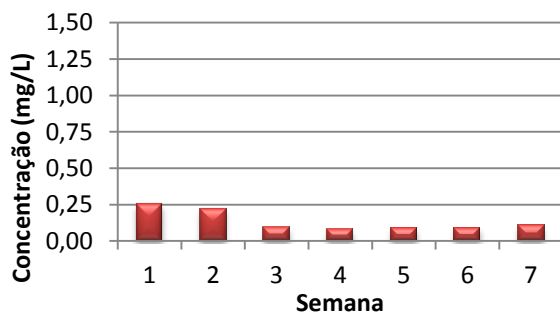


Ilustração 31) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

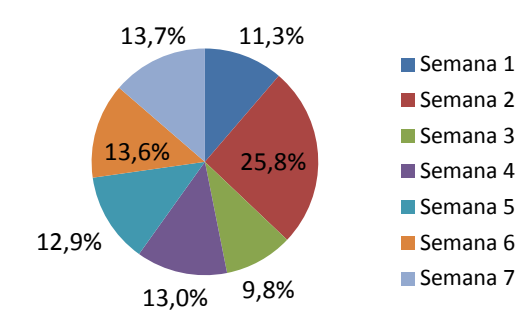


Ilustração 32) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 10 - Valores obtidos de concentração de fósforo no lixiviado e da distribuição da massa de fósforo lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Ao analisar os resultados anteriores conclui-se que o fósforo não é lixiviado em grandes quantidades. Não é evidente o efeito da aplicação de cinza no solo, relativamente ao solo de referência. Ao contrário, as diferenças entre o lixiviado do solo de referência e do solo com CaCO_3 , ou cinza + lama, já são evidentes. As concentrações mais elevadas são observadas na réplica #1 da coluna cinza + lama e na réplica #1 das colunas CaCO_3 , nas primeiras duas semanas do teste de lixiviação.

Relativamente à distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste observa-se que, na maior parte dos casos, a maior percentagem de fósforo é lixiviado na segunda semana. Em alguns dos casos observa-se também uma grande percentagem de fósforo lixiviado na terceira semana do teste, e numa das colunas observa-se uma percentagem elevada de fósforo lixiviada na última semana do teste. Isto pode indicar que, com o passar do tempo, o fósforo começa a ficar mais disponível no solo.

Cálcio

Na figura 11 são apresentados os resultados do cálcio obtidos para o lixiviado nas oito colunas de lixiviação durante as 7 semanas do teste de lixiviação. Os resultados são apresentados em concentração com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste.

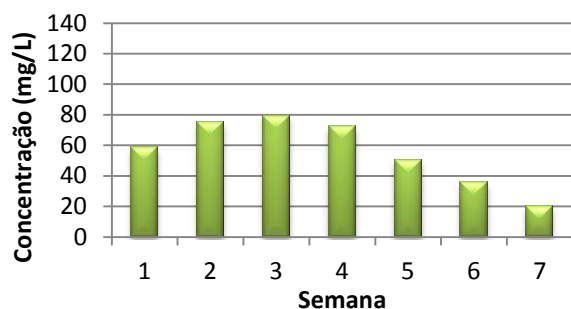


Ilustração 33) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

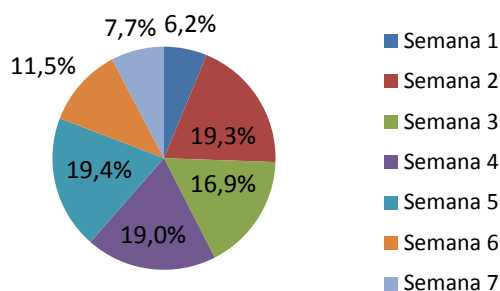


Ilustração 34) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

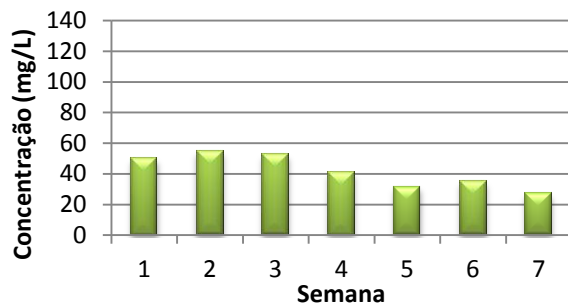


Ilustração 35) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

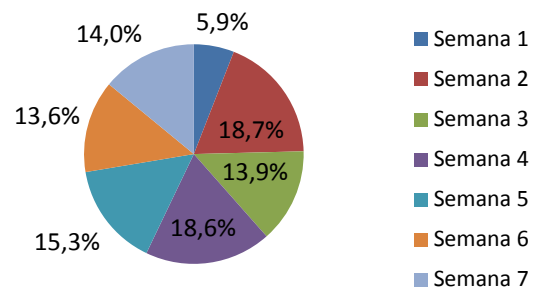


Ilustração 36) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

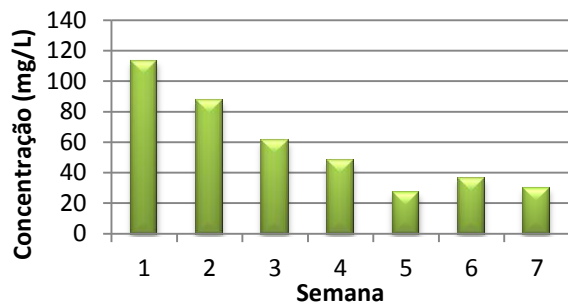


Ilustração 37) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

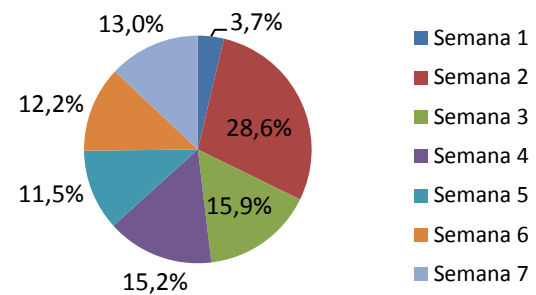


Ilustração 38) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

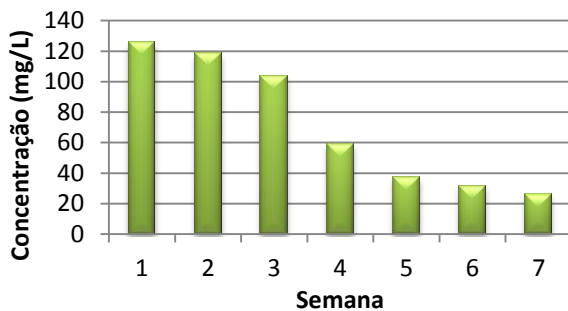


Ilustração 39) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

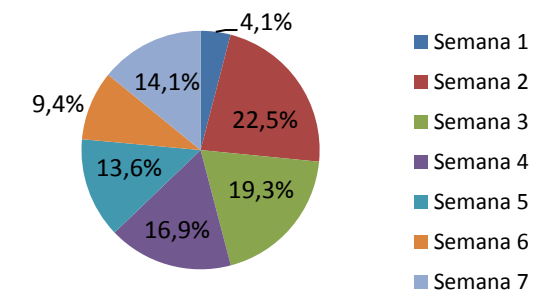


Ilustração 40) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

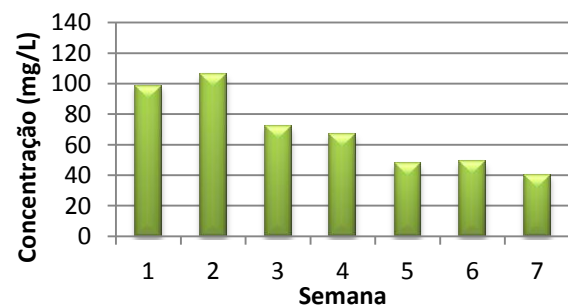


Ilustração 41) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

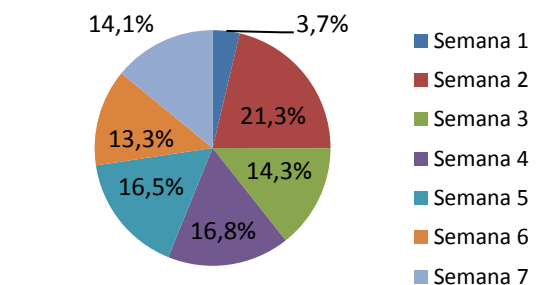


Ilustração 42) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

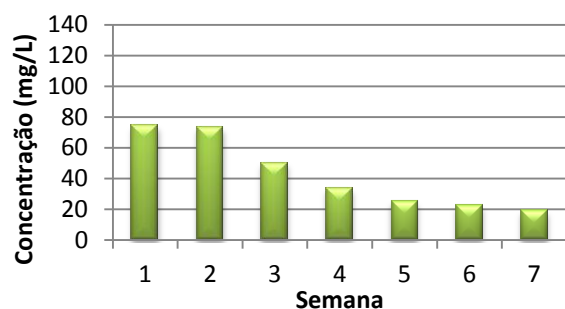


Ilustração 43) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #2

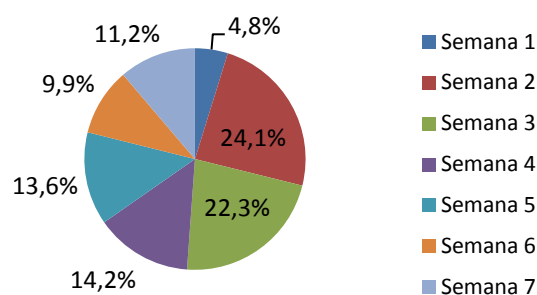


Ilustração 44) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #2

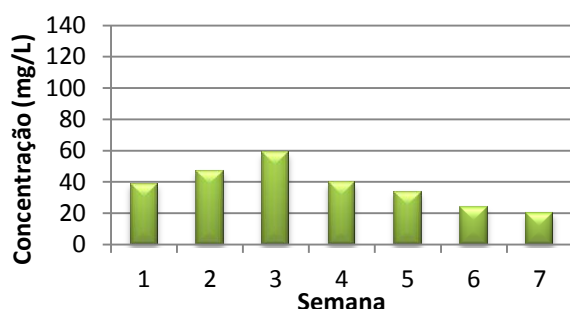


Ilustração 45) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

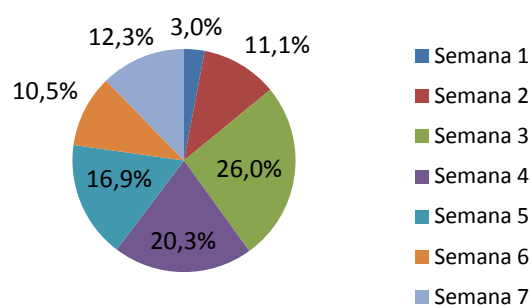


Ilustração 46) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

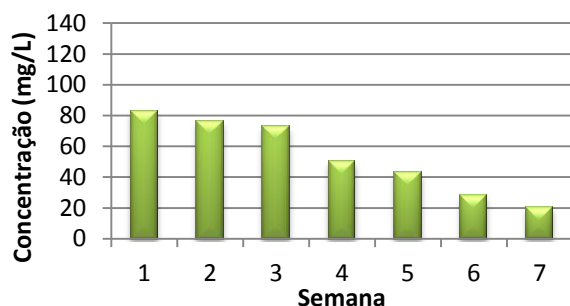


Ilustração 47) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

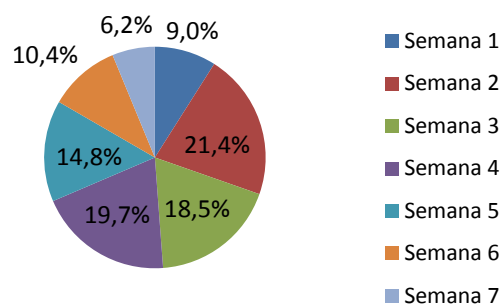


Ilustração 48) - Valores da distribuição da massa de cálcio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 11 - Valores obtidos de concentração de cálcio no lixiviado e da distribuição da massa de cálcio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Os valores obtidos para a concentração de cálcio no lixiviado, apresentam-se mais elevados em ambas as réplicas das colunas com cinza de biomassa. Ao compararmos com os valores paramétricos estipulados no Decreto-Lei nº 306/2007 para a água destinada a consumo humano, 100 mg/L, observa-se que, na réplica #1 da coluna cinza, o valor para a primeira semana ultrapassa o valor paramétrico recomendado. Na réplica #2 da coluna cinza, os valores das primeiras três semanas também ultrapassam o valor paramétrico recomendado no Decreto-Lei anteriormente referido. Podemos assim concluir que a adição de cinza no solo provocou um

aumento da concentração de cálcio no lixiviado acima dos valores recomendados. Para a generalidade das colunas de lixiviação a concentração de cálcio no lixiviado tende a diminuir com o tempo, ocorrendo um ligeiro aumento nas primeiras duas a três semanas em alguns casos, o que ocorre em ambas as réplicas das colunas solo de referência.

Quanto à distribuição da massa de cálcio pelas 7 semanas do teste de lixiviação, é possível notar nos gráficos apresentados que, o cálcio é lixiviado em maior percentagem nas semanas 2, 3 e 4, e isso verifica-se para a generalidade das colunas de lixiviação. Observa-se ainda que na primeira semana, é quando a lixiviação do cálcio é menor para todas as colunas.

Magnésio

O próximo elemento químico apresentado, na figura 12, é o magnésio. Os resultados do magnésio são apresentados em concentração, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste de lixiviação.

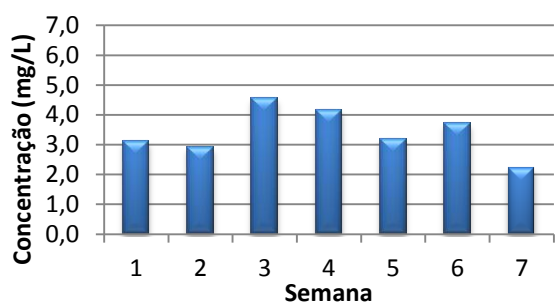


Ilustração 49) - Valores de concentração de magnésio obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

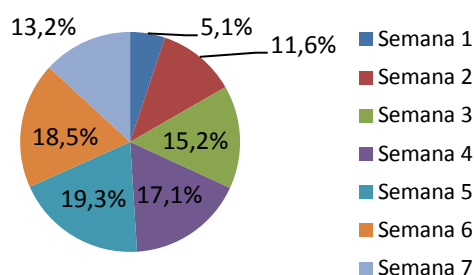


Ilustração 50) - Valores da distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

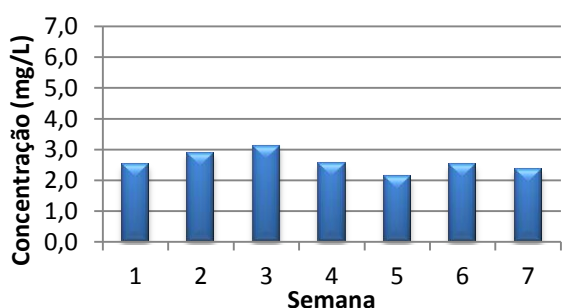


Ilustração 51) - Valores de concentração de magnésio obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

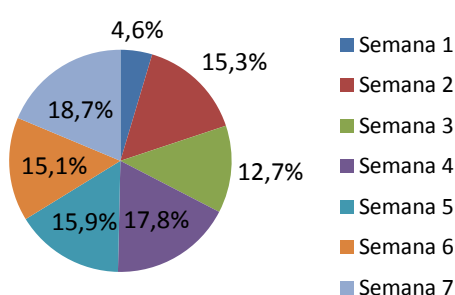


Ilustração 52) - Valores da distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

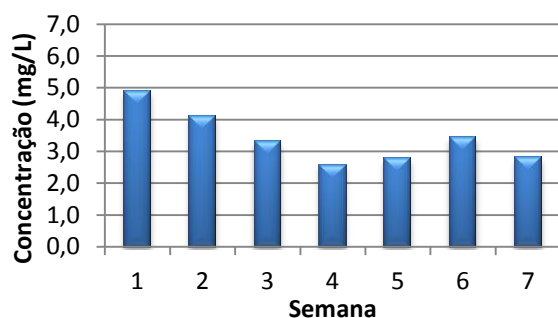


Ilustração 53) - Valores de concentração de magnésio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

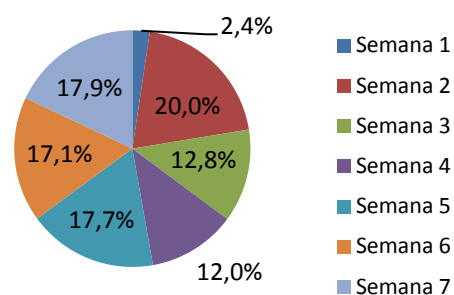


Ilustração 54) - Valores da distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

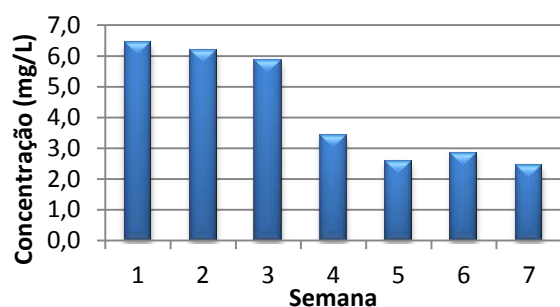


Ilustração 55) - Valores de concentração de fósforo obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

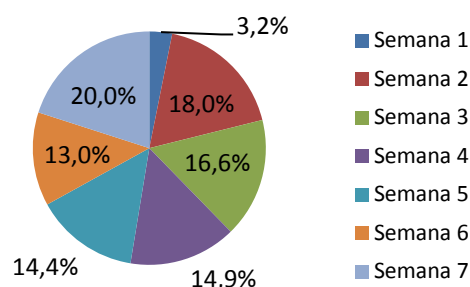


Ilustração 56) - Valores da distribuição da massa de fósforo lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

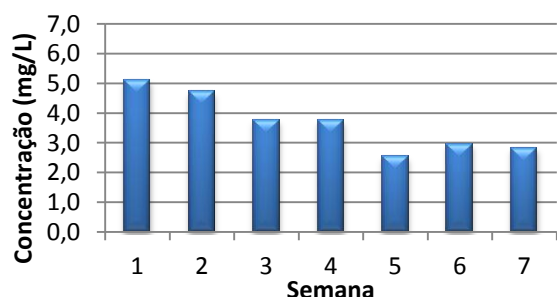


Ilustração 57) - Valores de concentração de magnésio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

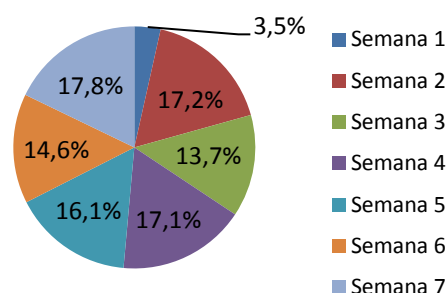


Ilustração 58) - Valores da distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

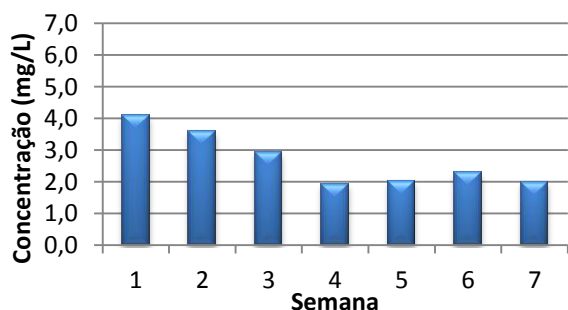


Ilustração 59) - Valores de concentração de magnésio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #2

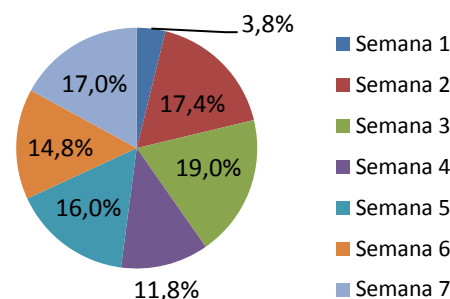


Ilustração 60) - Valores da distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #2

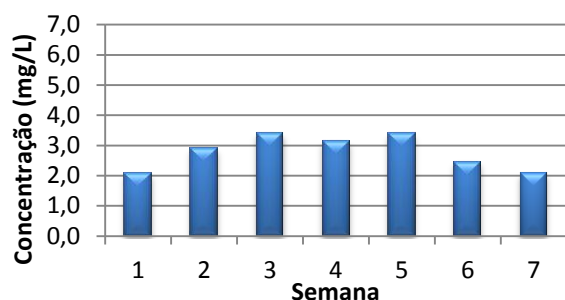


Ilustração 61) - Valores de concentração de magnésio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

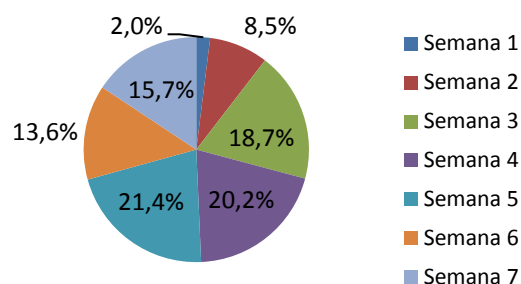


Ilustração 62) - Valores da distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

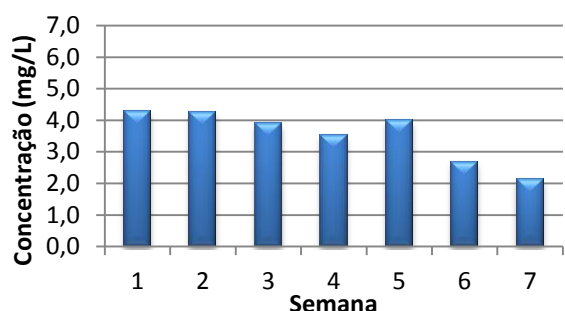


Ilustração 63) - Valores de concentração de magnésio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

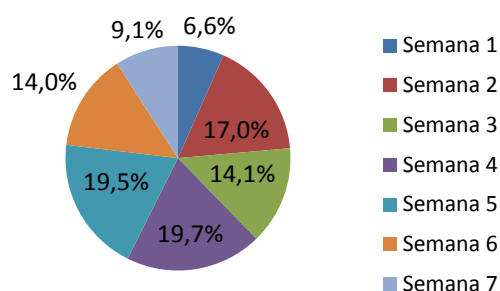


Ilustração 64) - Valores da distribuição da massa de magnésio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 12 - Valores obtidos de concentração de magnésio no lixiviado e da distribuição da massa de cálcio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Com base na figura anterior constata-se que, a concentração de magnésio no lixiviado não ultrapassa, o valor paramétrico estabelecido no Decreto-Lei nº 306/2007, ficando todos os valores obtidos claramente abaixo do valor recomendado de 50 mg/L. Apesar de não se destacar nenhum valor muito elevado e muito diferente entre todas as colunas, os valores mais elevados são, mais uma vez, observados em ambas as réplicas das colunas cinza. Para as últimas semanas do teste de lixiviação, não se verifica uma concordância na comparação entre as colunas, observando-se que, em algumas delas o valor da concentração de magnésio tende diminuir gradualmente, ao contrário de outras colunas em que tende a sofrer ligeiros aumentos.

No que respeita à distribuição da massa de magnésio lixiviada ao longo do teste de lixiviação, nota-se uma distribuição bastante semelhante durante as 7 semanas, com exceção da primeira semana, onde a massa de magnésio lixiviada é sempre muito baixa para todas as colunas.

Sódio

Os resultados obtidos para o sódio são apresentados na figura 13. Apresentam-se em concentração, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste de lixiviação.

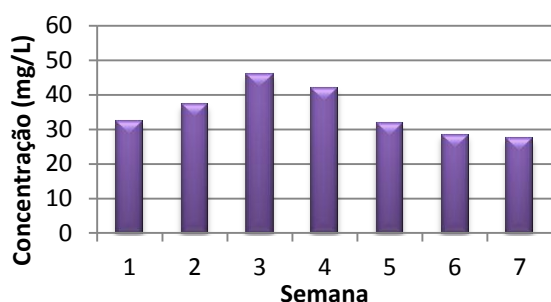


Ilustração 65) - Valores de concentração de sódio obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

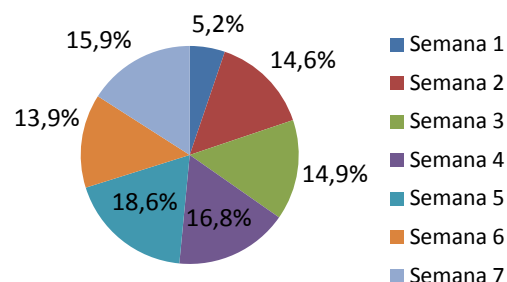


Ilustração 66) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

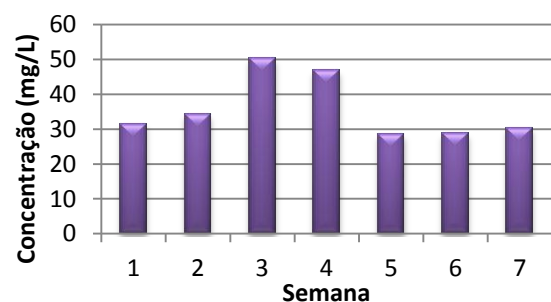


Ilustração 67) - Valores de concentração de sódio obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

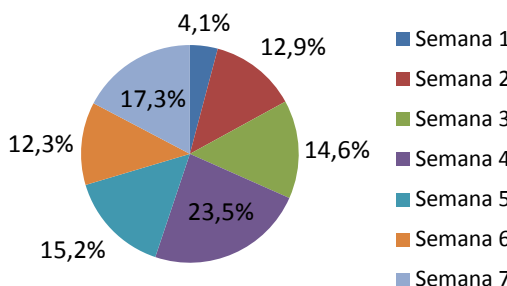


Ilustração 68) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

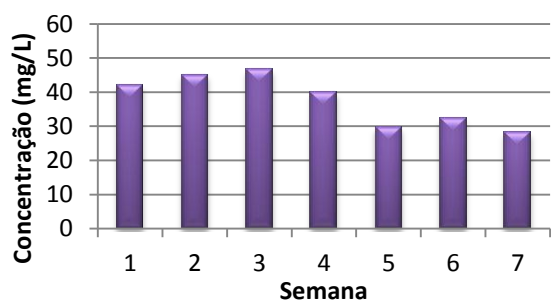


Ilustração 69) - Valores de concentração de sódio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

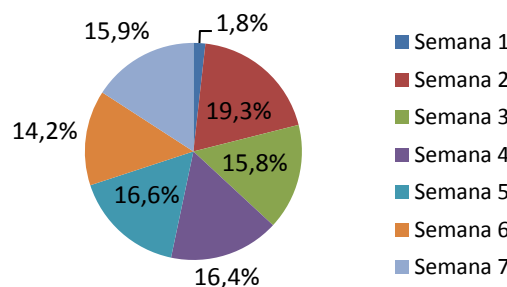


Ilustração 70) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

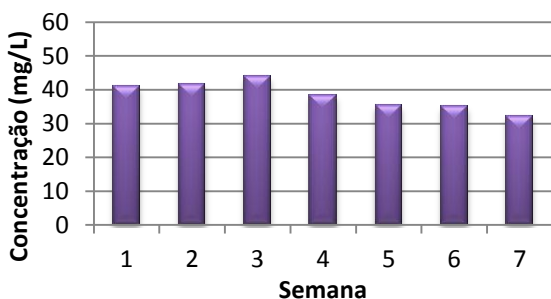


Ilustração 71) - Valores de concentração de sódio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

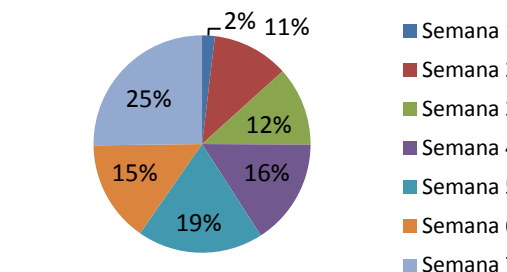


Ilustração 72) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

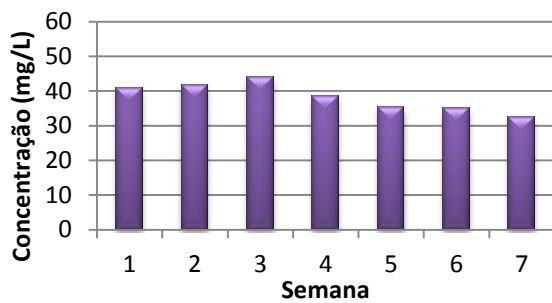


Ilustração 73) - Valores de concentração de cálcio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

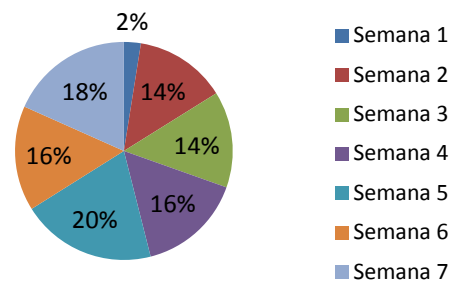


Ilustração 74) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

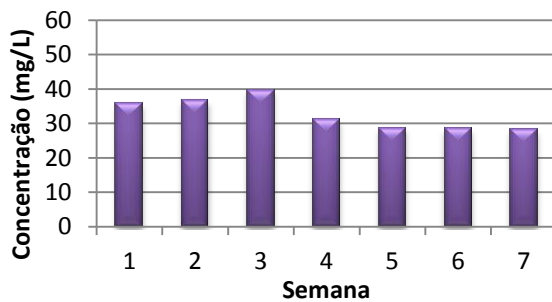


Ilustração 75) - Valores de concentração de sódio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #2

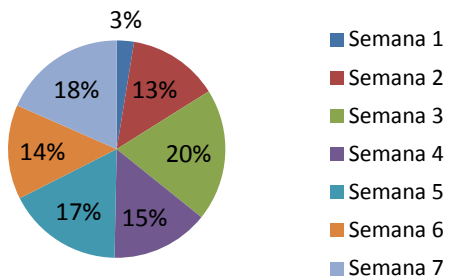


Ilustração 76) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #2

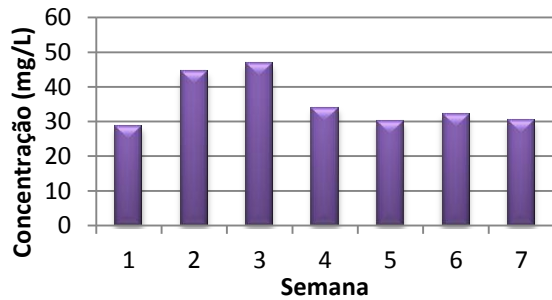


Ilustração 77) - Valores de concentração de sódio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

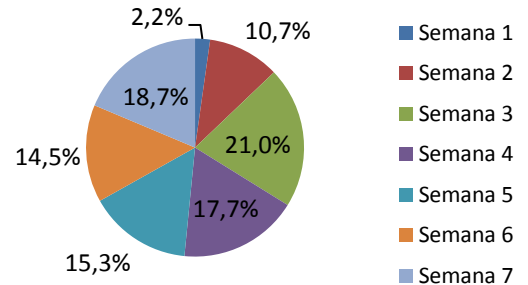


Ilustração 78) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

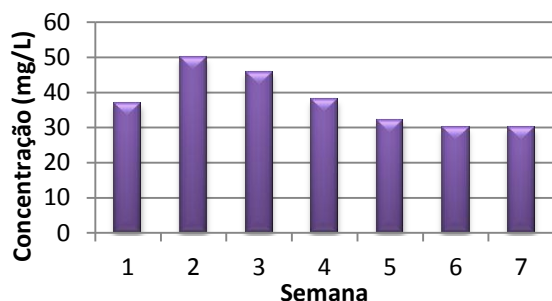


Ilustração 79) - Valores de concentração de sódio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

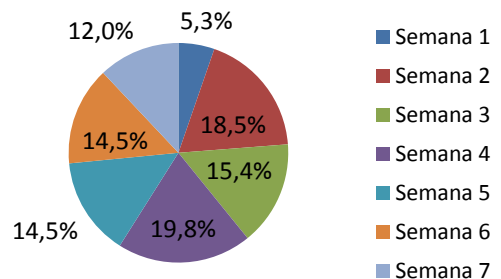


Ilustração 80) - Valores da distribuição da massa de sódio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 13 - Valores obtidos de concentração de sódio no lixiviado e da distribuição da massa de sódio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Sendo o valor paramétrico estipulado no Decreto-Lei nº 306/2007 de 200 mg/L para o sódio, observa-se nos resultados obtidos que o lixiviado não ultrapassa esse valor, ficando consideravelmente abaixo. Pela análise dos resultados, não se observa nenhuma coluna onde os valores de lixiviado se destaquem em relação às outras, encontrando-se todas com valores de concentração máxima entre os 40 e os 50 mg/L. De uma forma geral as colunas apresentam um aumento da concentração e sódio no lixiviado até à terceira semana do teste de lixiviação, e seguidamente ocorre uma diminuição gradual da concentração que tende a estabilizar.

A análise realizada à distribuição da massa de sódio lixiviada durante as 7 semanas em que decorreu o teste, mostra que a quantidade de sódio presente no lixiviado se distribuiu com uma percentagem bastante semelhante, com exceção da primeira semana. Na primeira semana do teste a quantidade de sódio no lixiviado foi bastante reduzida, atingindo o máximo de cerca de 5% na réplica #1 da coluna solo de referência.

Potássio

Relativamente ao potássio, os resultados obtidos são apresentados na figura 14, onde se pode observar a concentração de potássio no lixiviado, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste de lixiviação.

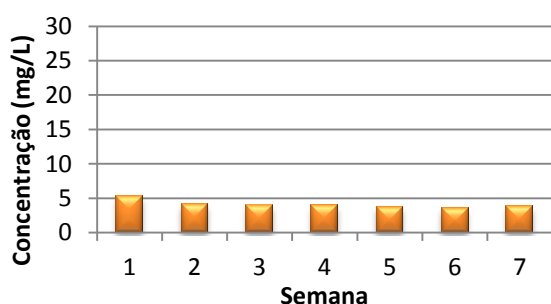


Ilustração 81) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

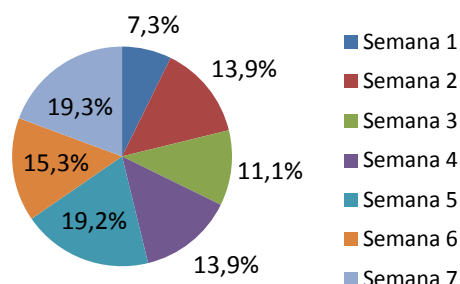


Ilustração 82) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

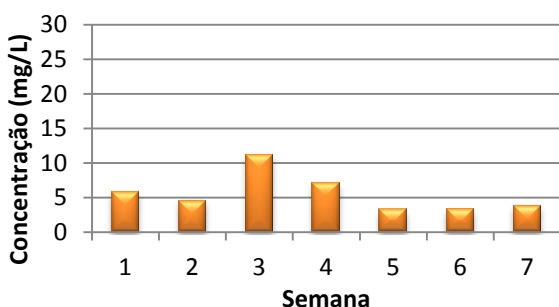


Ilustração 83) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

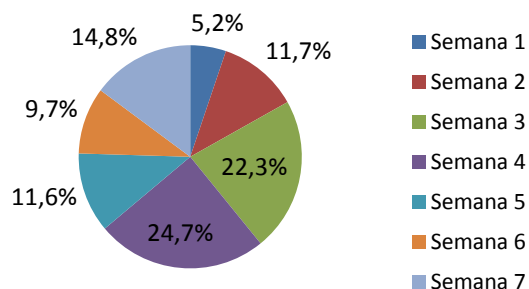


Ilustração 84) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

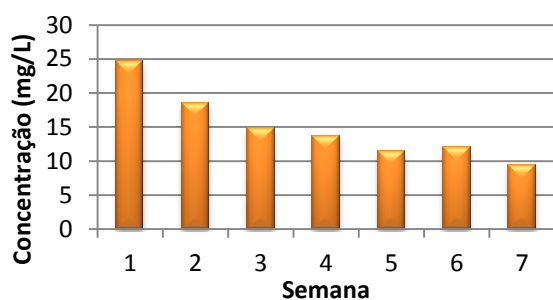


Ilustração 85) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

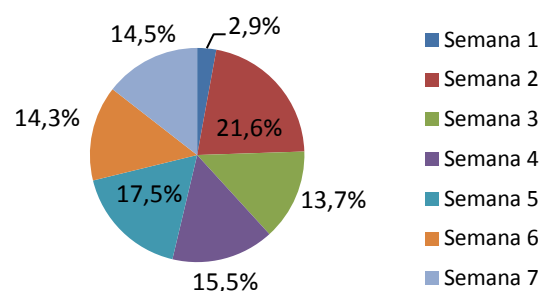


Ilustração 86) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

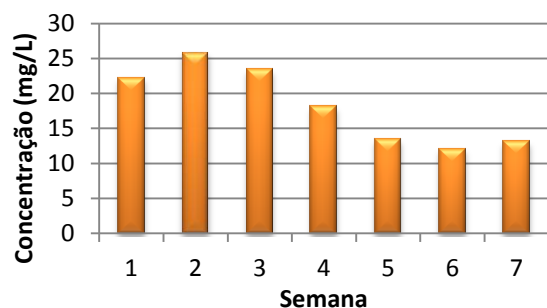


Ilustração 87) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

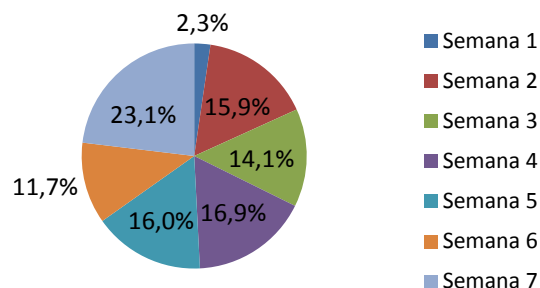


Ilustração 88) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

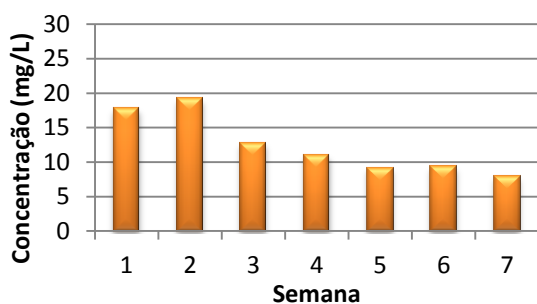


Ilustração 89) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

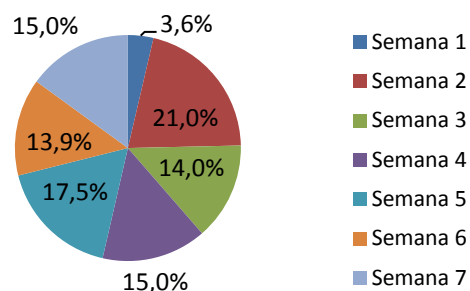


Ilustração 90) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

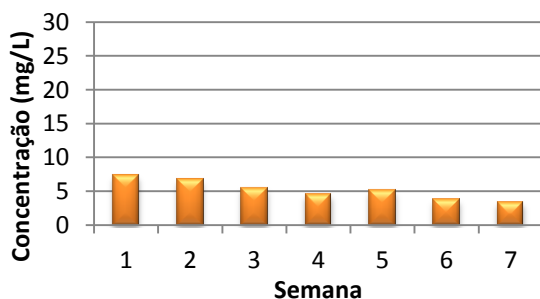


Ilustração 91) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #2

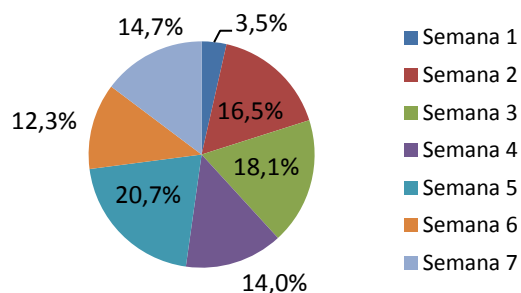


Ilustração 92) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #2

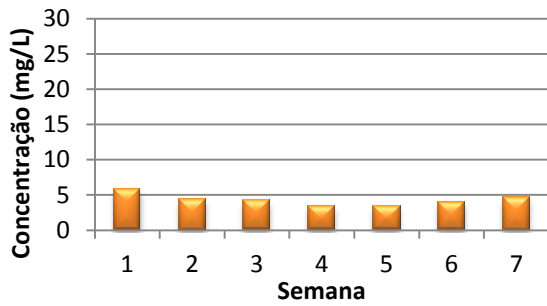


Ilustração 93) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

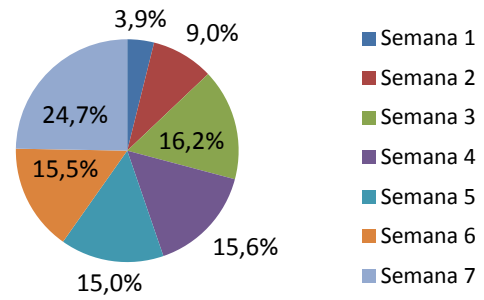


Ilustração 94) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

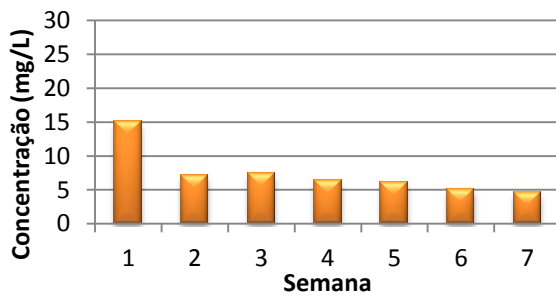


Ilustração 95) - Valores de concentração de potássio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

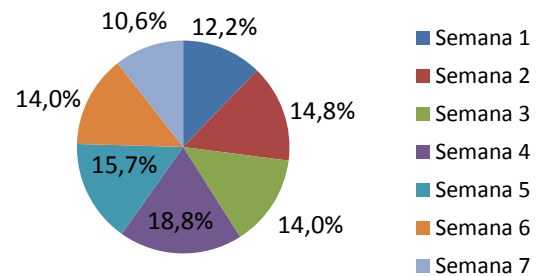


Ilustração 96) - Valores da distribuição da massa de potássio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 14 - Valores obtidos de concentração de potássio no lixiviado e da distribuição da massa de potássio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Graficamente é possível observar que a cinza tem uma grande influência nos valores da concentração de potássio presente no lixiviado, uma vez que, para ambas as réplicas das colunas cinza, a concentração de potássio atinge valores máximos na ordem dos 25 mg/L. As colunas onde se observam valores mais baixos de concentração de potássio são as do solo referência e as de cinza + lama. Para estas últimas, apesar de lhes ter sido aplicada a cinza, os seus valores não se apresentam tão elevados como os das colunas onde apenas foi aplicada cinza, o que se deve à adição de lama em conjunto com a cinza de biomassa. Os valores de concentração mais elevados para todas as colunas, observam-se nas primeiras três semanas, decrescendo até à semana 7.

A distribuição da massa de potássio lixiviada apresenta-se relativamente semelhante para as semanas do teste de lixiviação, com a exceção mais uma vez, da semana 1 onde a massa lixiviada é bastante inferior às restantes semanas.

Ferro

No caso do ferro os resultados são apresentados na figura 15, onde se pode observar a concentração de ferro no lixiviado, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste.

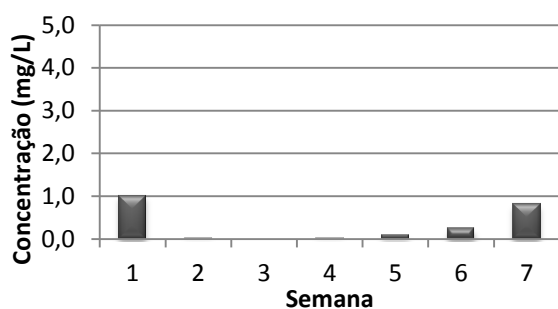


Ilustração 97) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

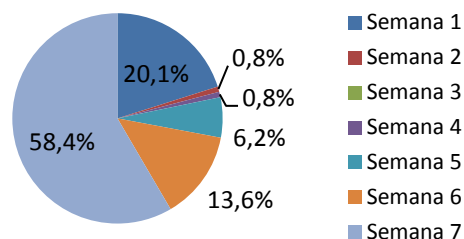


Ilustração 98) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

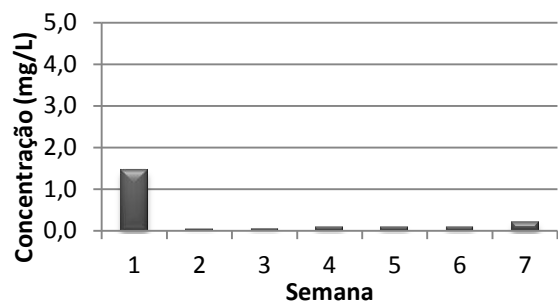


Ilustração 99) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

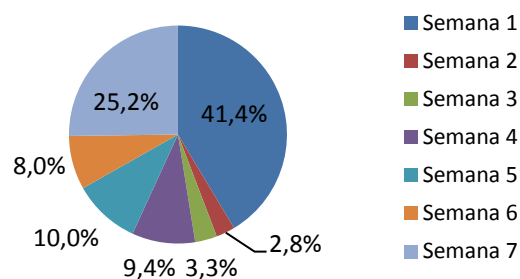


Ilustração 100) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

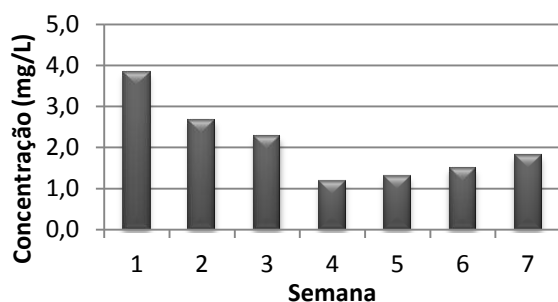


Ilustração 101) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

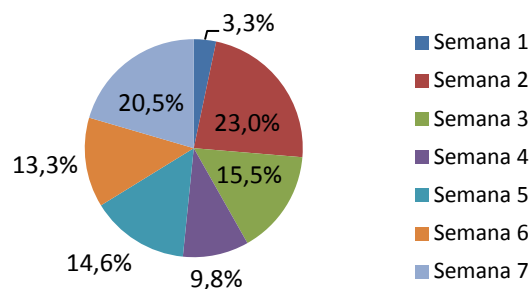


Ilustração 102) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

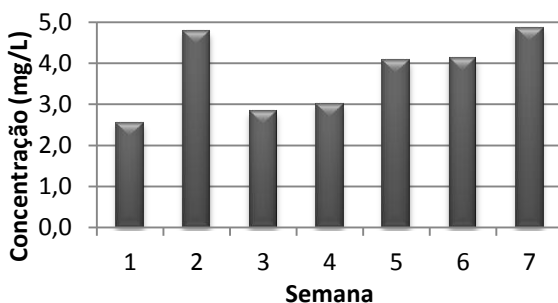


Ilustração 103) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

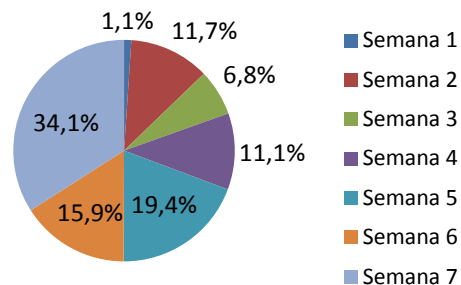


Ilustração 104) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

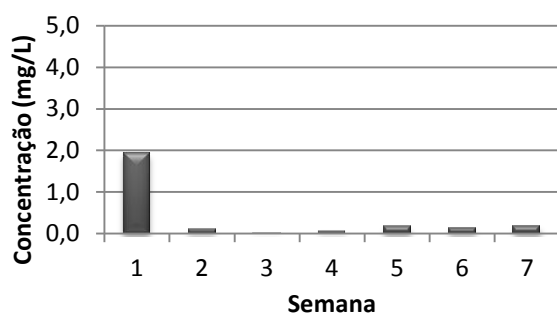


Ilustração 105) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #1

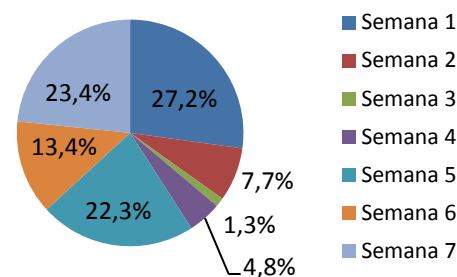


Ilustração 106) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #1

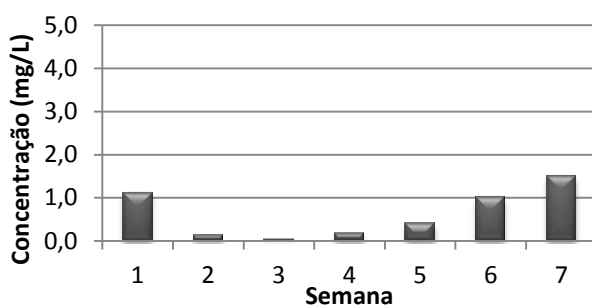


Ilustração 107) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #2

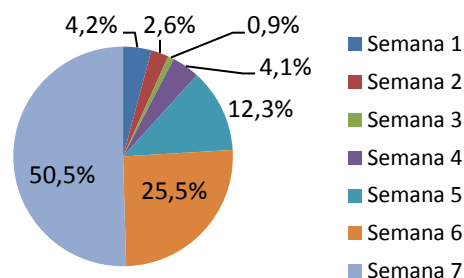


Ilustração 108) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #2

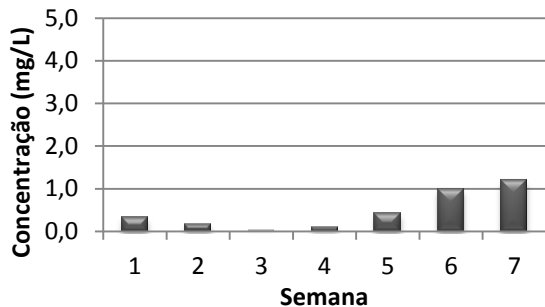


Ilustração 109) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

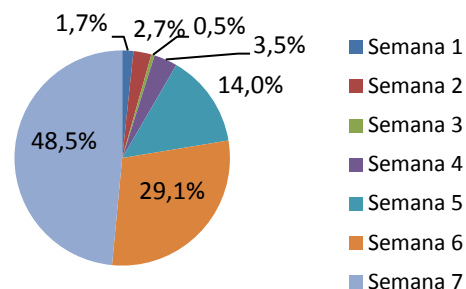


Ilustração 110) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

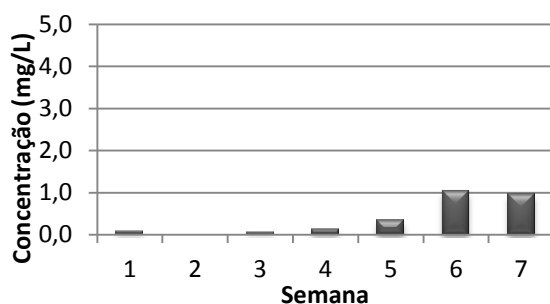


Ilustração 111) - Valores de concentração de ferro obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

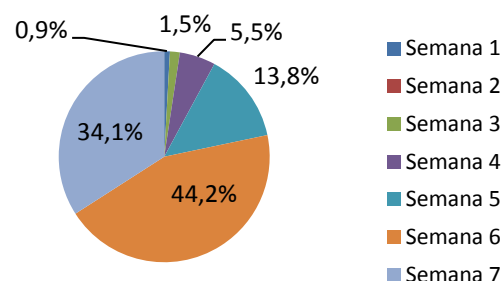


Ilustração 112) - Valores da distribuição da massa de ferro lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 15 - Valores obtidos de concentração de ferro no lixiviado e da distribuição da massa de ferro lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Pela análise dos resultados é possível observar que o valor paramétrico estipulado no Decreto-lei nº 306/2007 para o ferro, 0,2 mg/L, é ultrapassado em todas as colunas de lixiviação, para pelo menos numa das semanas de duração do teste. Isto vai implicar que não sejam cumpridos os valores estipulados para a qualidade da água para consumo humano. Os valores mais elevados encontram-se novamente em ambas as réplicas das colunas cinza, atingindo valores próximos de 5 mg/L, o que ultrapassa em muito o valor estabelecido na legislação. Para a generalidade das colunas, nota-se um decréscimo na concentração de ferro no lixiviado até às semanas 3 e 4, seguindo-se um aumento gradual da mesma. Pode indicar que o ferro vai ficando mais disponível com o passar do tempo. As colunas cinza + lama apresentam valores baixos, o que pode indicar que a lama vai ter uma grande influência na libertação/retenção de ferro, do solo para o lixiviado, o que pode vir a ser benéfico. Relativamente ao Decreto-Lei nº 236/98, para águas de rega, observa-se que os valores estabelecidos para o ferro não ultrapassam o valor máximo admissível de 5 mg/L, assim, de acordo com o parâmetro, concentração de ferro, este lixiviado poderia ser utilizado para rega.

A distribuição da massa de ferro lixiviada, mostra-se muito variável ao longo do teste de lixiviação e entre as colunas analisadas. Para as colunas solo de referência, a maior parte do ferro é lixiviada nas semanas 1 e 7. No entanto, para as restantes, a maior percentagem de massa de ferro lixiviada observa-se nas três últimas semanas. Isto pode indicar, como já foi referido, que o ferro se torna mais disponível com o passar do tempo.

Manganês

Em seguida, na figura 16, são apresentados os resultados obtidos para o manganês. Nesta figura pode observar-se a concentração de manganês no lixiviado, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste de lixiviação.

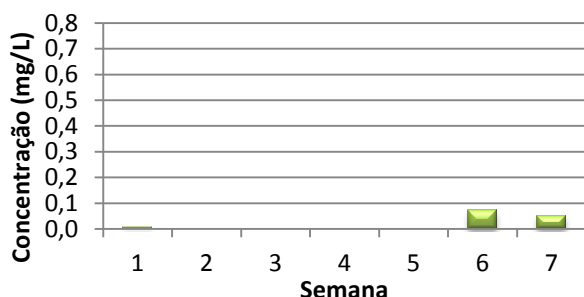


Ilustração 113) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

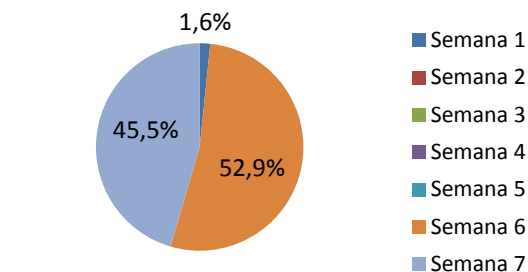


Ilustração 114) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

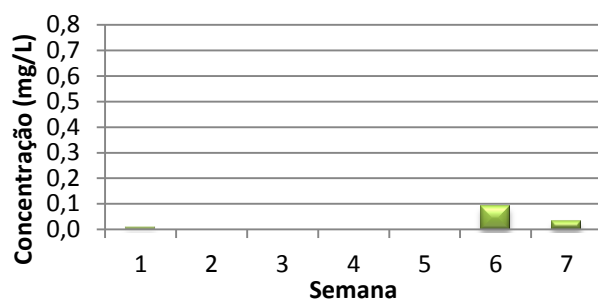


Ilustração 115) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

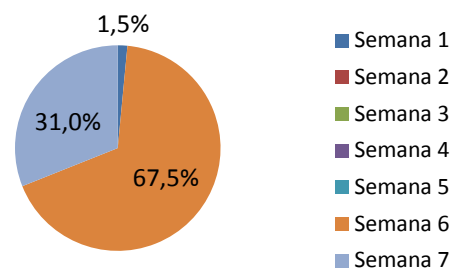


Ilustração 116) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

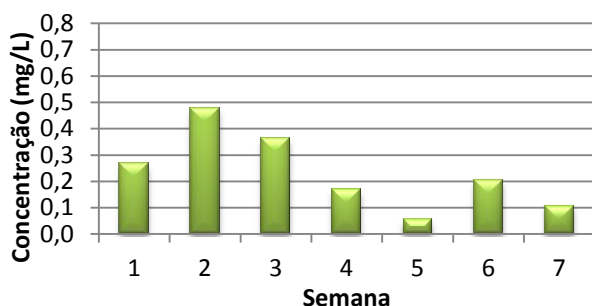


Ilustração 117) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

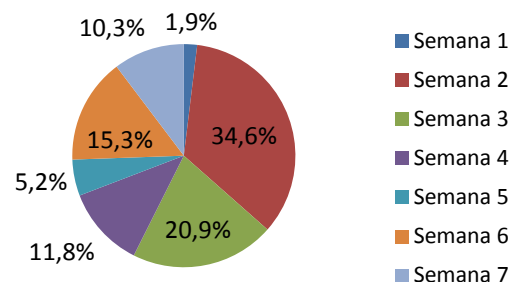


Ilustração 118) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

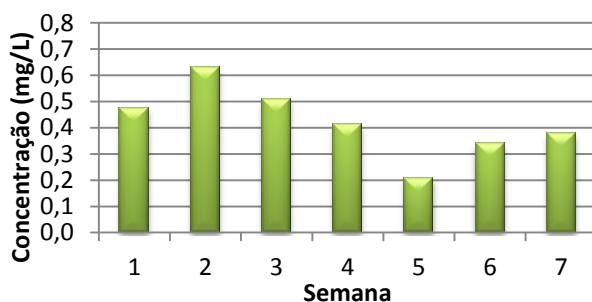


Ilustração 119) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

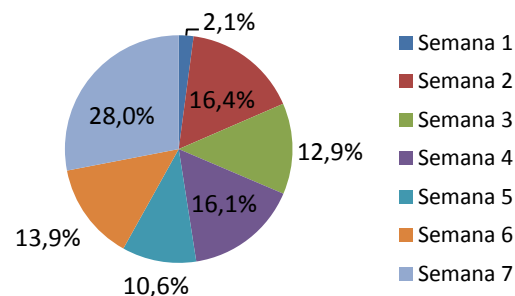


Ilustração 120) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

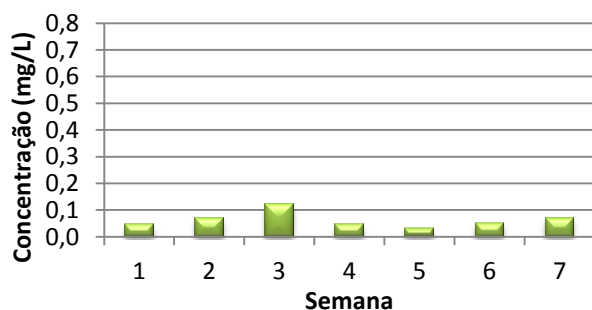


Ilustração 121) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

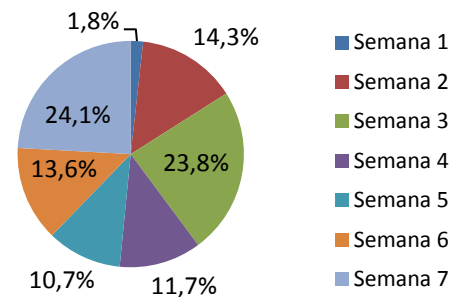


Ilustração 122) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

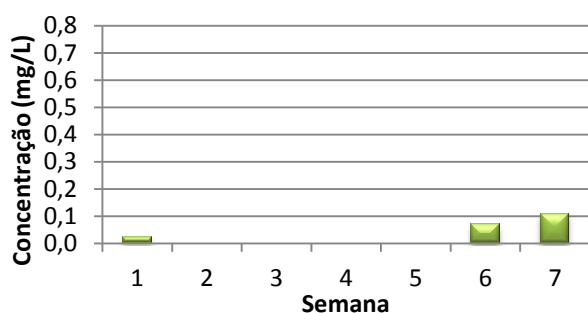


Ilustração 123) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #2

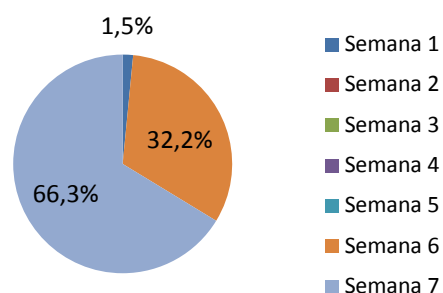


Ilustração 124) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #2

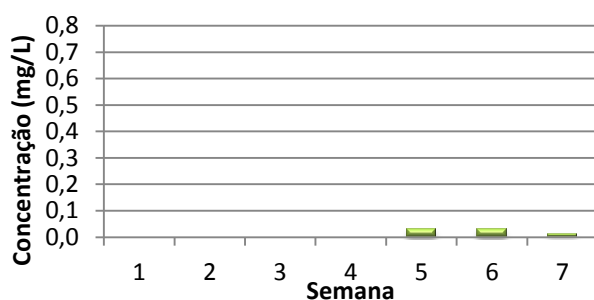


Ilustração 125) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

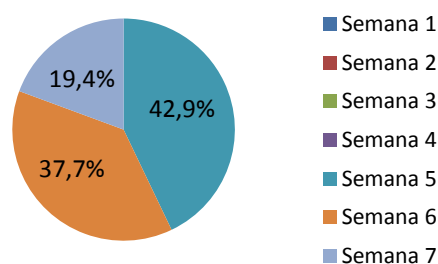


Ilustração 126) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

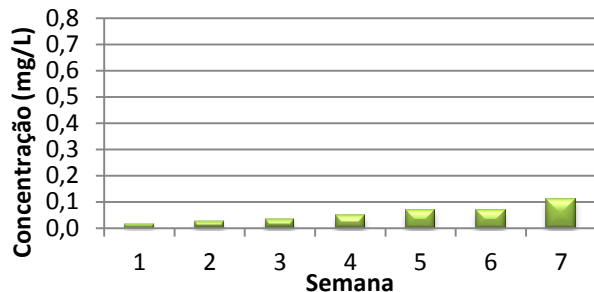


Ilustração 127) - Valores de concentração de manganês obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

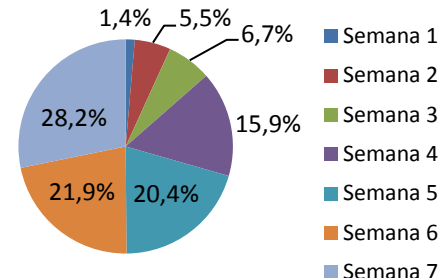


Ilustração 128) - Valores da distribuição da massa de manganês lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 16 - Valores obtidos de concentração de manganês no lixiviado e da distribuição da massa de manganês lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

O valor estabelecido no Decreto-Lei nº 306/2007 para a concentração de manganês é de 0,05 mg/L. Quando observamos os valores obtidos para as colunas de lixiviação estudadas concluímos que o valor de concentração de manganês é mais elevado que o valor estipulado, para todas elas, em pelo menos uma das semanas do teste. As concentrações mais elevadas são observadas em ambas as réplicas nas colunas cinza, na segunda semana do teste, e podem ser consideradas concentrações elevadas (uma ordem de grandeza) de manganês no lixiviado, atingindo valores entre os 0,5 e 0,6 mg/L, perfeitamente distintos das outras situações. Para as restantes colunas

nota-se um aumento da concentração de manganês nas últimas duas semanas do teste de lixiviação, podendo indicar o aumento de disponibilidade do manganês ao longo do tempo. O valor estabelecido no Decreto-Lei nº 236/98, referente a água para rega, estipula que o manganês não pode ultrapassar os 10 mg/L, o que se verifica nos valores obtidos para o lixiviado analisado. Desta forma o lixiviado obtido poderia ser utilizado para rega, no que respeita ao manganês.

A distribuição da massa de manganês lixiviada, apresenta-se muito distribuída pelas 7 semanas, com exceção da primeira, onde se verifica uma quantidade de massa lixiviada muito menor. Em algumas das colunas, observa-se uma massa lixiviada elevada para a última semana do teste, não sendo tão acentuada no caso da réplica #1 da coluna cinza. Para as colunas solo de referência, nota-se que a lixiviação de manganês ocorre quase na totalidade, para as últimas duas semanas do teste de lixiviação, assim como para a réplica #2 da coluna CaCO_3 , o que pode indicar o aumento da disponibilidade deste elemento com o passar do tempo.

Cobre

Na figura 17, são apresentados os resultados obtidos para o cobre. São apresentados os resultados em termos de concentração de cobre no lixiviado, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste.

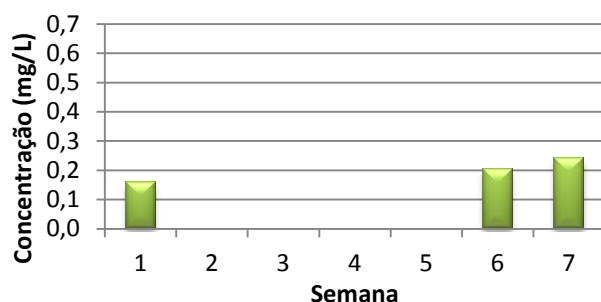


Ilustração 129) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

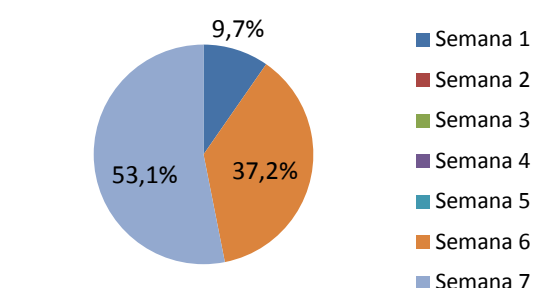


Ilustração 130) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

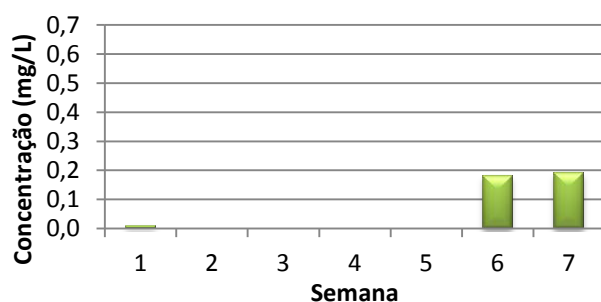


Ilustração 131) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

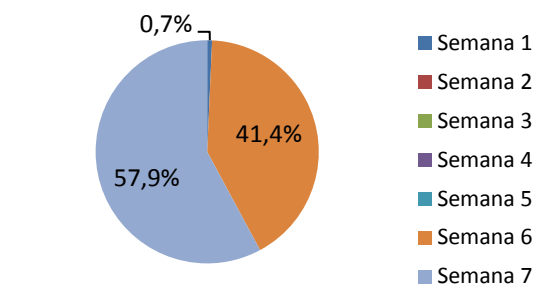


Ilustração 132) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

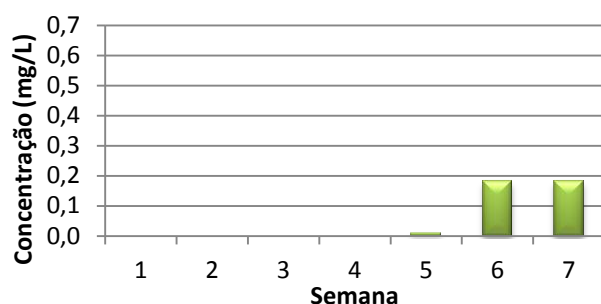


Ilustração 133) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

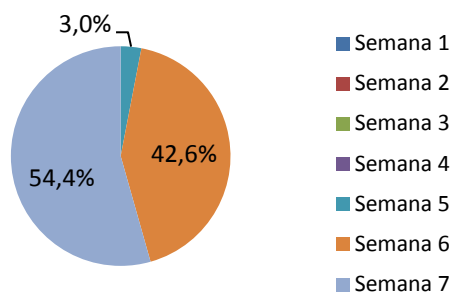


Ilustração 134) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

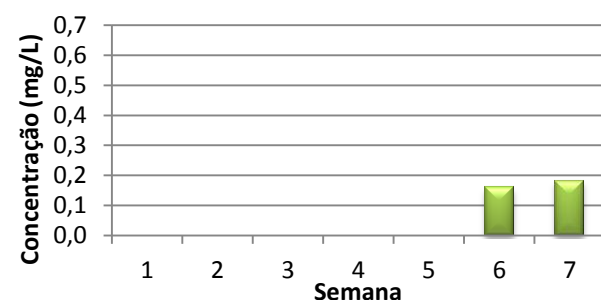


Ilustração 135) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

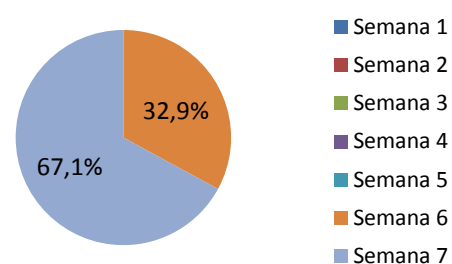


Ilustração 136) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

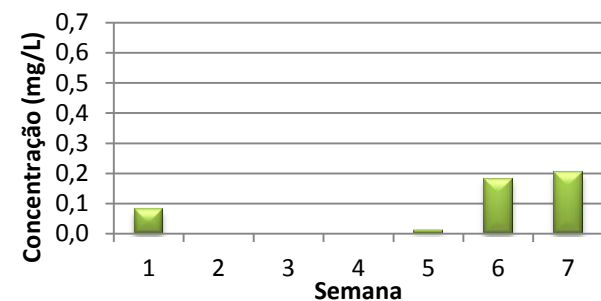


Ilustração 137) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

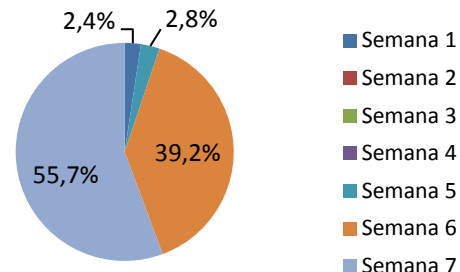


Ilustração 138) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

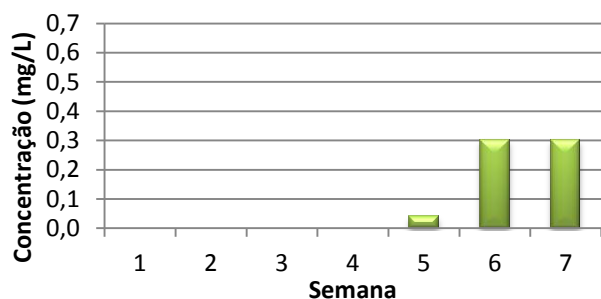


Ilustração 139) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #2

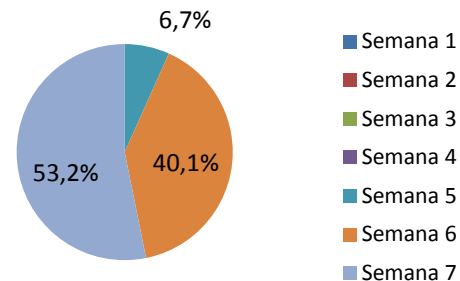


Ilustração 140) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #2

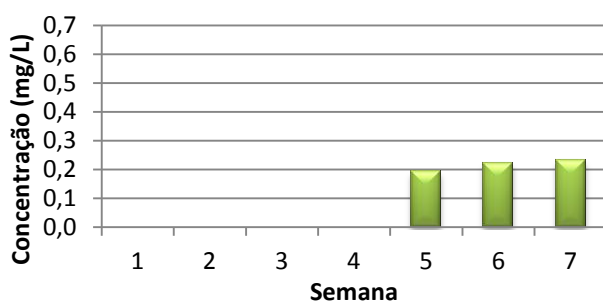


Ilustração 141) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

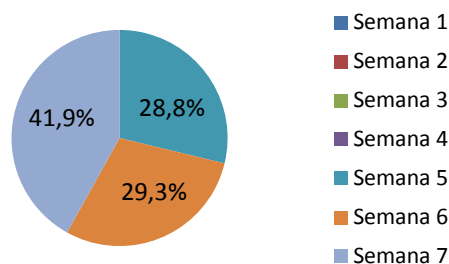


Ilustração 142) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

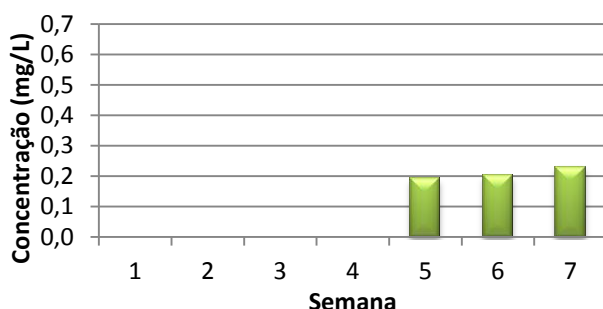


Ilustração 143) - Valores de concentração de cobre obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

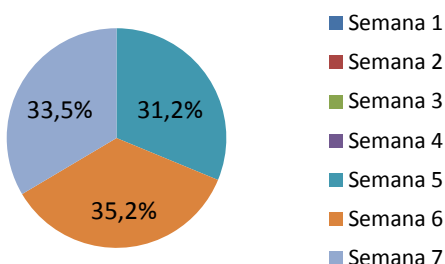


Ilustração 144) - Valores da distribuição da massa de cobre lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 17 - Valores obtidos de concentração de cobre no lixiviado e da distribuição da massa de cobre lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Ao analisar as concentrações de cobre no lixiviado constata-se que, para nenhuma das colunas é ultrapassado o valor paramétrico estabelecido no Decreto-Lei nº 306/2007 de 2mg/L. Em nenhuma das colunas são atingidos valores muito elevados, e entre as 8 colunas de lixiviação não são observadas diferenças notórias. Conclui-se ainda que a concentração de cobre no lixiviado tende a aumentar nas últimas duas semanas em todas as réplicas, o que pode indicar que o cobre se torna mais disponível com o passar do tempo, como já observado para outros elementos,

Pela análise da distribuição da massa de cobre lixiviada, observa-se que esta é essencialmente lixiviada nas semanas 6 e 7 do teste de lixiviação, para todas as colunas analisadas.

Zinco

Na figura 18 são apresentados os resultados do zinco obtidos para o lixiviado nas oito colunas de lixiviação durante as 7 semanas do teste. Os resultados são apresentados em concentração com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas e duração do teste de lixiviação.

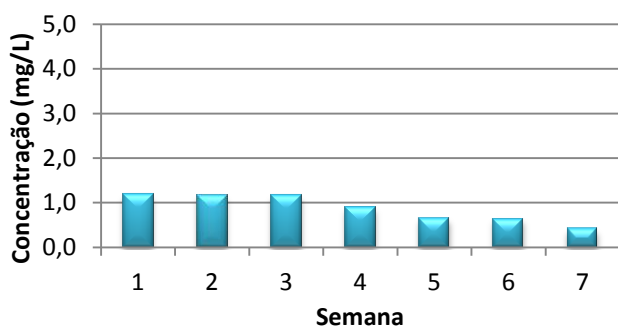


Ilustração 145) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

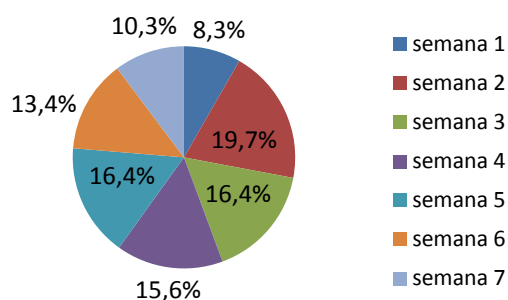


Ilustração 146) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

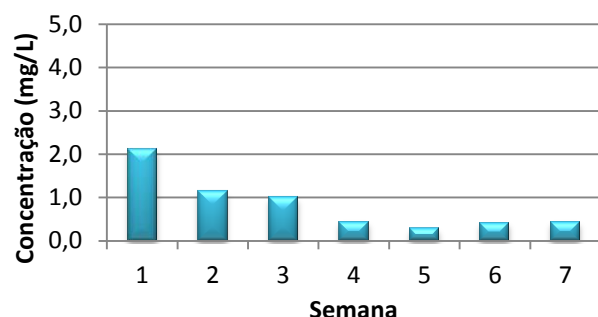


Ilustração 147) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

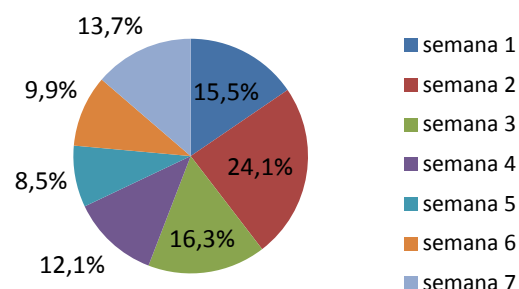


Ilustração 148) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

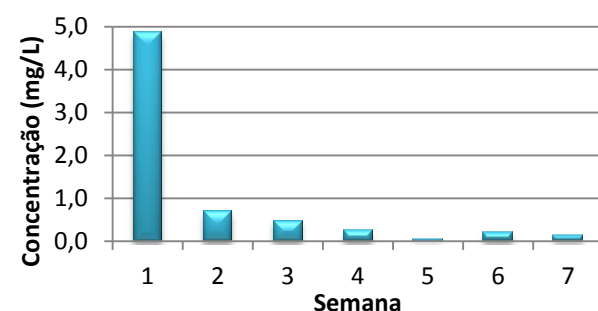


Ilustração 149) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

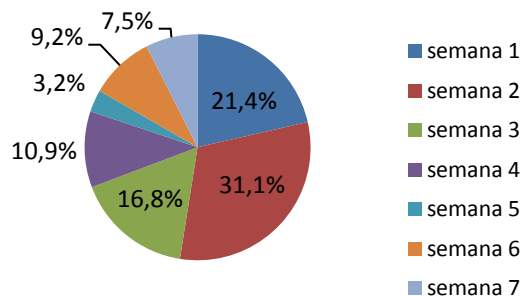


Ilustração 150) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

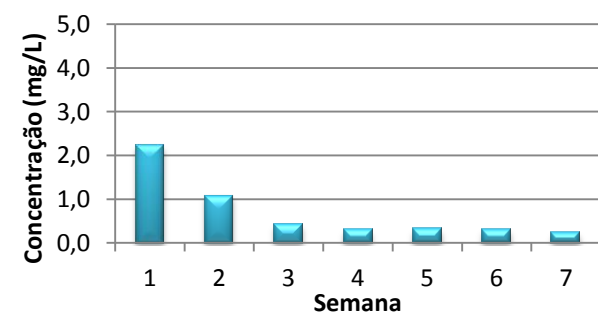


Ilustração 151) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

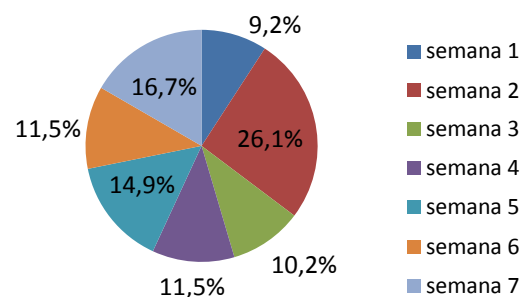


Ilustração 152) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

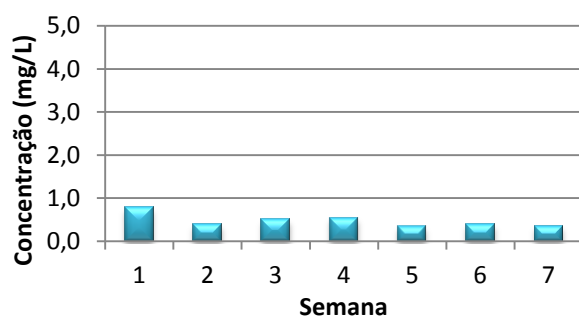


Ilustração 153) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #1

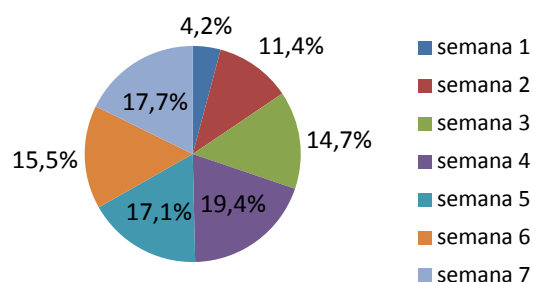


Ilustração 154) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #1

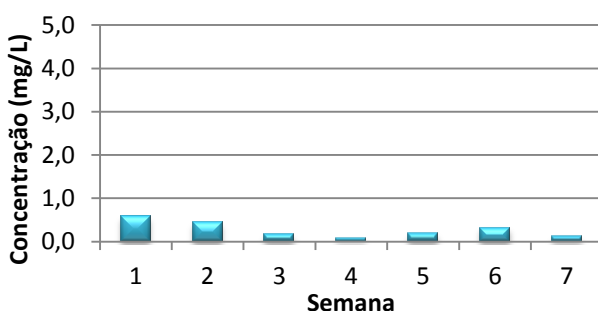


Ilustração 155) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna CaCO_3 , réplica #2

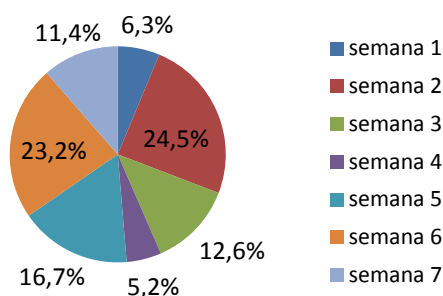


Ilustração 156) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO_3 , réplica #2

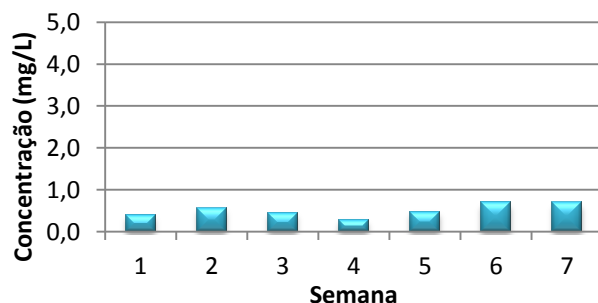


Ilustração 157) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

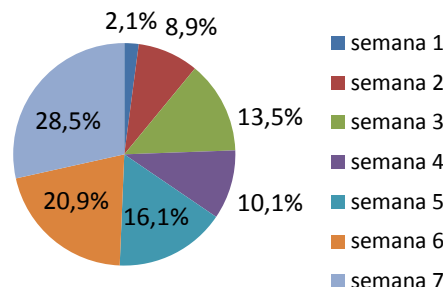


Ilustração 158) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

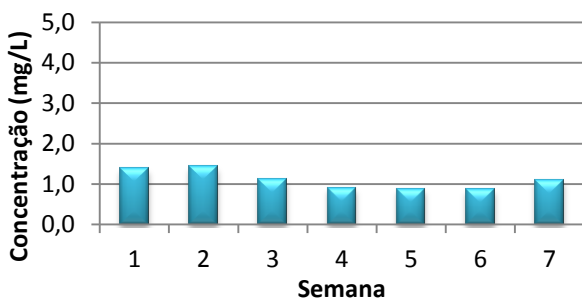


Ilustração 159) - Valores de concentração de zinco obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

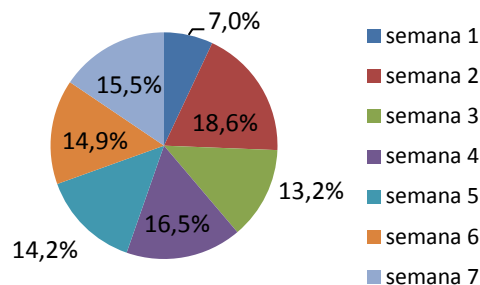


Ilustração 160) - Valores da distribuição da massa de zinco lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 18 - Valores obtidos de concentração de zinco no lixiviado e da distribuição da massa de zinco lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

Para a generalidade das colunas de lixiviação, a concentração de zinco no lixiviado é consideravelmente uniforme ao longo das 7 semanas do teste de lixiviação, com a exceção das colunas cinza. Na réplica #1 das colunas cinza, observa-se uma concentração de zinco bastante elevada na primeira semana do teste, em comparação com o resto das colunas, atingido cerca de 5 mg/L. Na réplica #2 a concentração na primeira semana atinge valores acima dos 2 mg/L. Verifica-se assim que a cinza tem influência na concentração deste elemento no lixiviado. Este lixiviado poderia ainda ser utilizado como água de rega, uma vez que o valor máximo admissível é de 10 mg/L e o lixiviado obtido não ultrapassa os 5 mg/L.

A distribuição da massa de zinco lixiviada é bastante variada entre todas as colunas de lixiviação sendo, em muitas delas, um pouco mais acentuada na segunda semana do teste.

Cádmio

Na figura 19 são apresentados os resultados de cádmio obtidos para o lixiviado nas oito colunas de lixiviação durante as 7 semanas do teste de lixiviação. Os resultados são apresentados em concentração com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste.

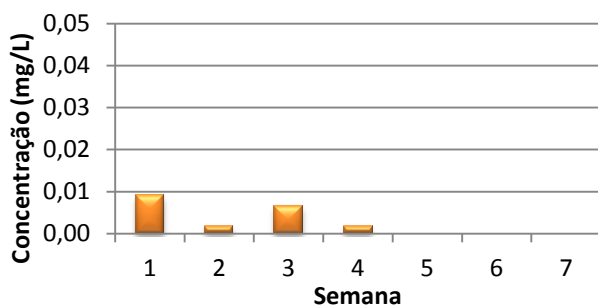


Ilustração 161) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

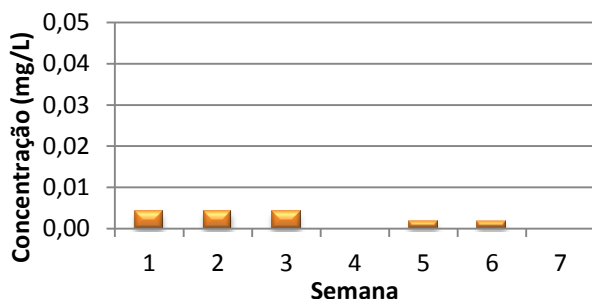


Ilustração 163) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

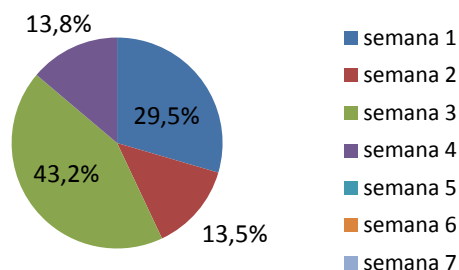


Ilustração 162) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

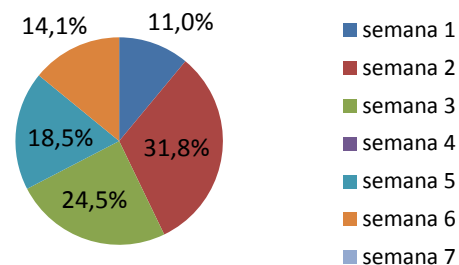


Ilustração 164) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

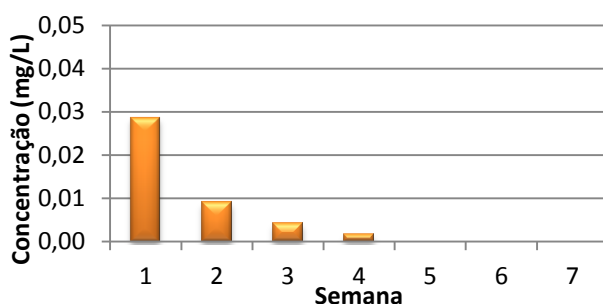


Ilustração 165) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

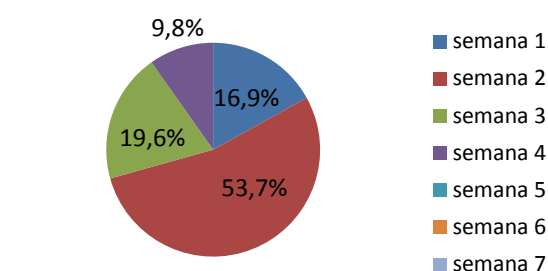


Ilustração 166) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

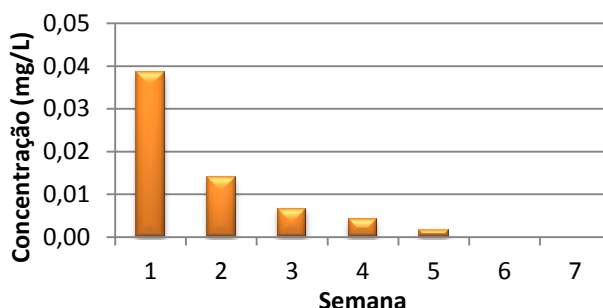


Ilustração 167) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

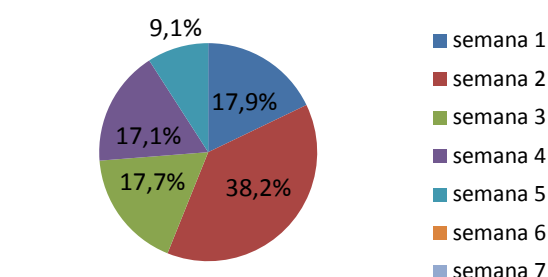


Ilustração 168) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

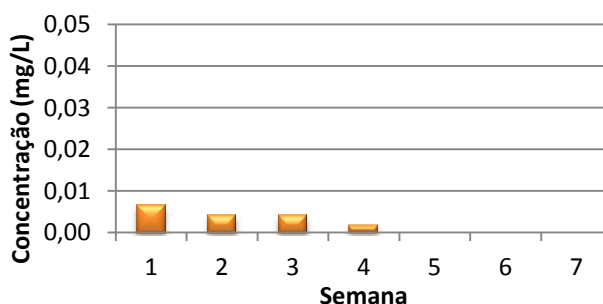


Ilustração 169) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

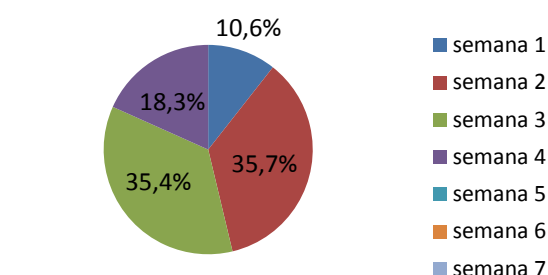


Ilustração 170) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

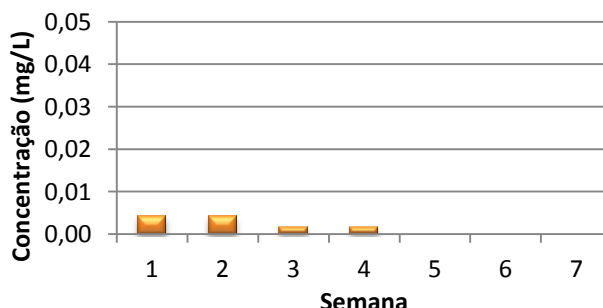


Ilustração 171) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #2

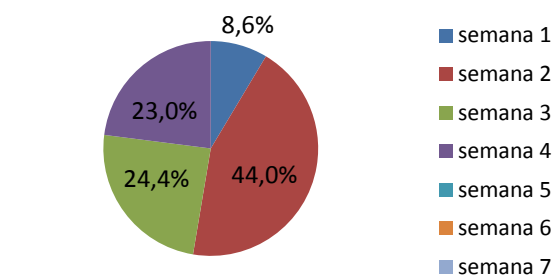


Ilustração 172) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #2

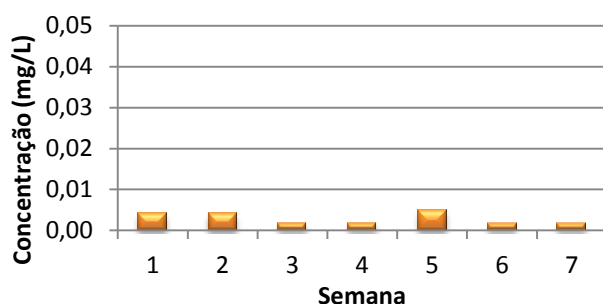


Ilustração 173) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

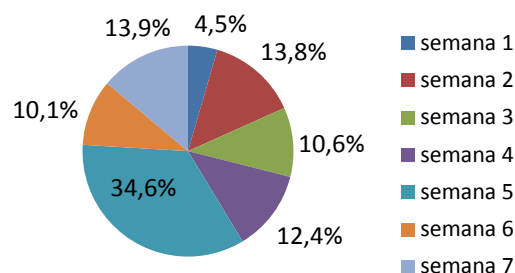


Ilustração 174) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

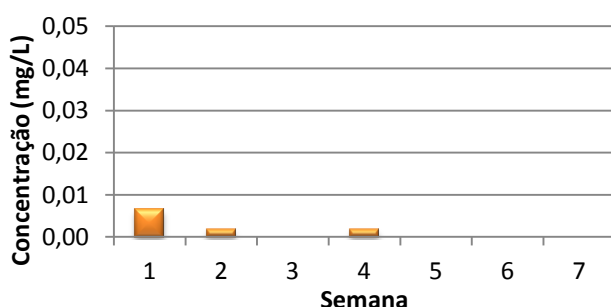


Ilustração 175) - Valores de concentração de cádmio obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

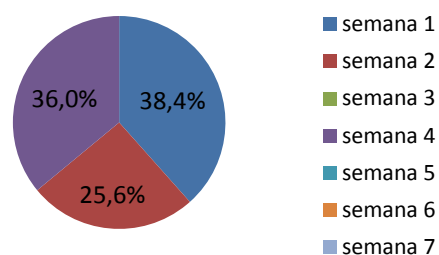


Ilustração 176) - Valores da distribuição da massa de cádmio lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 19 - Valores obtidos de concentração de cádmio no lixiviado e da distribuição da massa de cádmio lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

A concentração de cádmio estabelecida no Decreto-Lei nº 306/2007 é de 0,005 mg/L. O que se verifica na figura anterior é que para ambas as réplicas das colunas cinza, esta concentração é ultrapassada, atingindo valores entre 0,03 e 0,04 mg/L para a primeira semana do teste. Para as restantes colunas, na sua maior parte, as concentrações encontram-se entre os valores e 0 e 0,01 mg/L. Sabe-se assim que a cinza provoca um aumento da concentração deste elemento no lixiviado. Observa-se ainda que a concentração de cádmio no lixiviado, tende a diminuir ao longo do tempo. Os valores obtidos não ultrapassam o valor máximo admissível estipulado para águas de rega de 0,05 mg/L, podendo este lixiviado, no que respeita a este elemento, ser utilizados como água para rega.

A lixiviação do cádmio é essencialmente realizada nas primeiras 4 semanas do teste de lixiviação, com exceção das colunas solo de referência, onde a massa lixiviada é também elevada para a semana 5. Verifica-se ainda que a maior parte do cádmio é lixiviada na semana 2 do teste, para a maior parte das colunas.

Nitratos

Na figura 20, são apresentados os resultados obtidos para os nitratos. São apresentados os resultados em termos de concentração de nitratos no lixiviado, com as unidades de mg/L e é ainda apresentada a distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas de duração do teste.

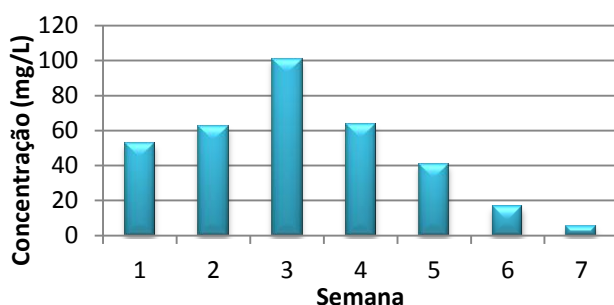


Ilustração 177) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna solo referência, réplica #1

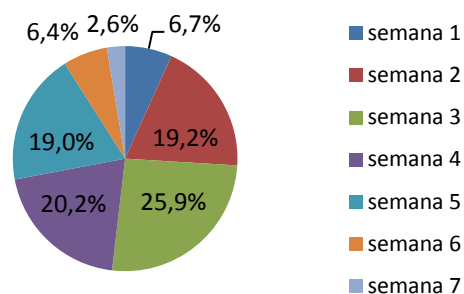


Ilustração 178) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo referência, réplica #1

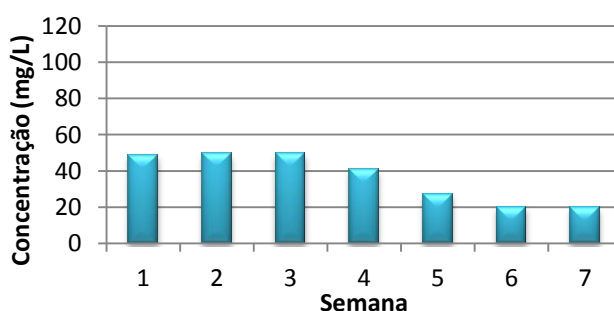


Ilustração 179) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna solo de referência, réplica #2

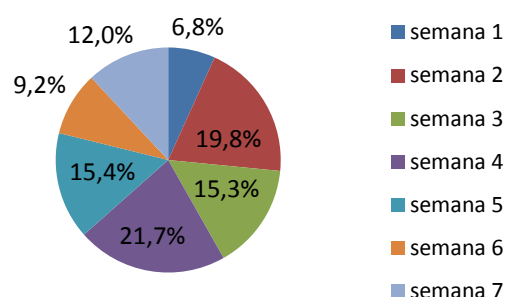


Ilustração 180) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna solo de referência, réplica #2

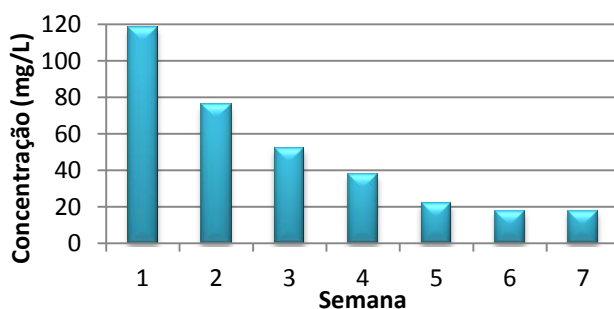


Ilustração 181) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #1

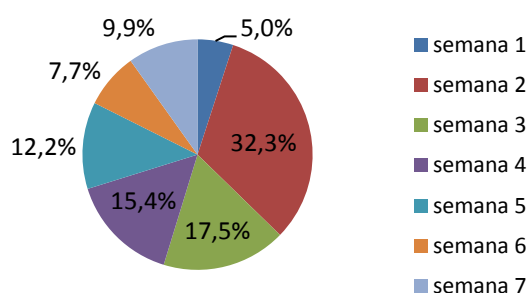


Ilustração 182) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #1

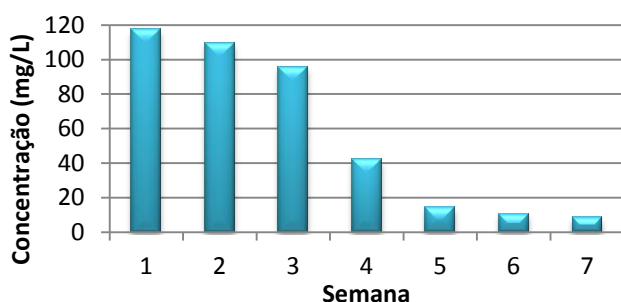


Ilustração 183) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna cinza, réplica #2

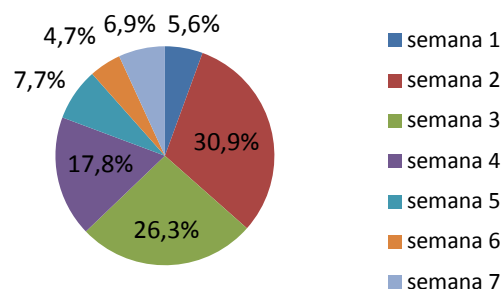


Ilustração 184) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza, réplica #2

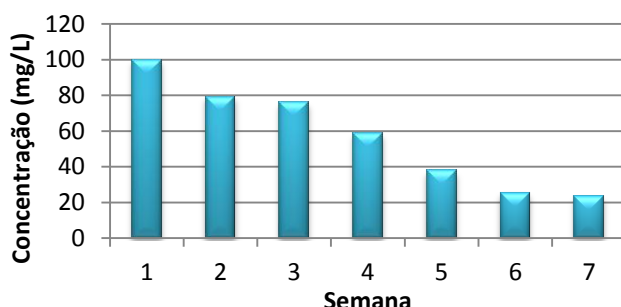


Ilustração 185) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #1

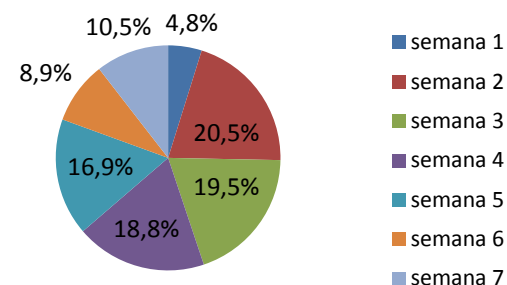


Ilustração 186) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #1

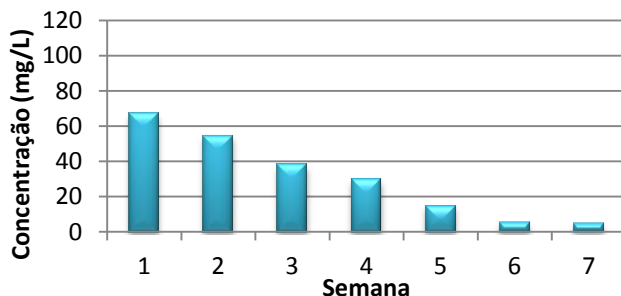


Ilustração 187) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna CaCO₃, réplica #2

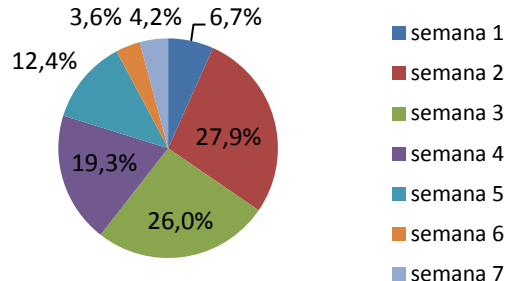


Ilustração 188) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna CaCO₃, réplica #2

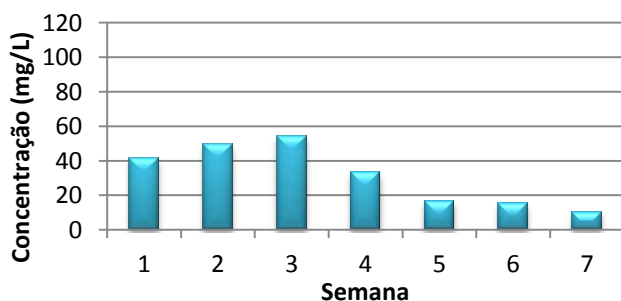


Ilustração 189) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #1

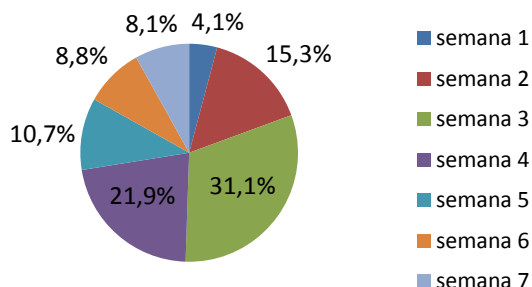


Ilustração 190) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #1

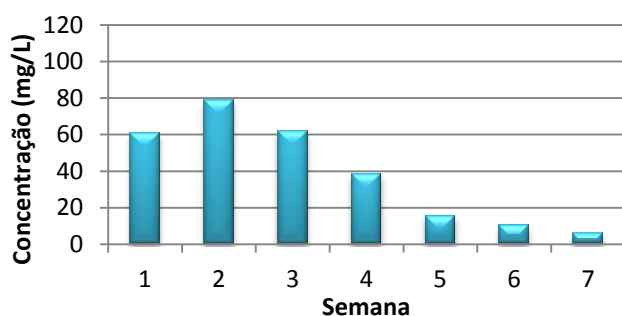


Ilustração 191) - Valores de concentração de nitratos obtidos para o lixiviado na coluna cinza + lama, réplica #2

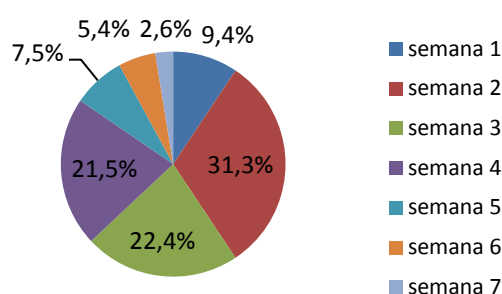


Ilustração 192) - Valores da distribuição da massa de nitratos lixiviada pelas 7 semanas do teste para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 20 - Valores obtidos de concentração de nitratos no lixiviado e da distribuição da massa de nitratos lixiviada ao longo das 7 semanas, para as 8 colunas de lixiviação

O lixiviado apresenta uma concentração de nitratos considerável, sendo possível verificar que as concentrações mais elevadas ocorrem em ambas as réplicas das colunas cinza. Mais uma vez observa-se a influência da cinza na concentração de um elemento químico no lixiviado, neste caso os nitratos. Para ambas as réplicas das colunas solo de referência e cinza + lama, a concentração de nitratos no lixiviado tende a aumentar até à segunda ou terceira semana. Para as réplicas das colunas cinza e CaCO_3 a concentração tende a diminuir a partir da primeira semana, notando-se uma leve estabilização nas duas últimas semanas.

A distribuição da massa de nitratos pelas 7 semanas do teste é essencialmente observada nas semanas 2, 3 e 4 para todas as colunas de lixiviação analisadas, sendo que, na primeira semana do teste é onde se observam valores menores de massa de nitratos lixiviada.

4.2.2. Caracterização do solo

No final do teste de lixiviação as oito colunas foram desmontadas e retirou-se o perfil de solo das mesmas para a sua caracterização. Procedeu-se à realização das análises necessárias à avaliação dos vários parâmetros e fez-se a comparação destes com os do solo inicial. Realizaram-se vários procedimentos por forma a determinar os seguintes parâmetros: pH, condutividade e elementos químicos. Neste ponto do trabalho será ainda apresentada a distribuição dos elementos pelo perfil de solo, o balanço mássico para as colunas de lixiviação, entre o solo inicial e o solo final, e uma comparação entre os métodos de extração dos elementos químicos analisados. A base desta abordagem, foram os resultados da quantificação dos diferentes parâmetros, que se encontram listados nos Anexos B e C do presente trabalho.

A análise dos diferentes parâmetros, tal como a distribuição dos elementos pelo perfil de solo, foi determinada tendo em conta o esquema da figura 21.

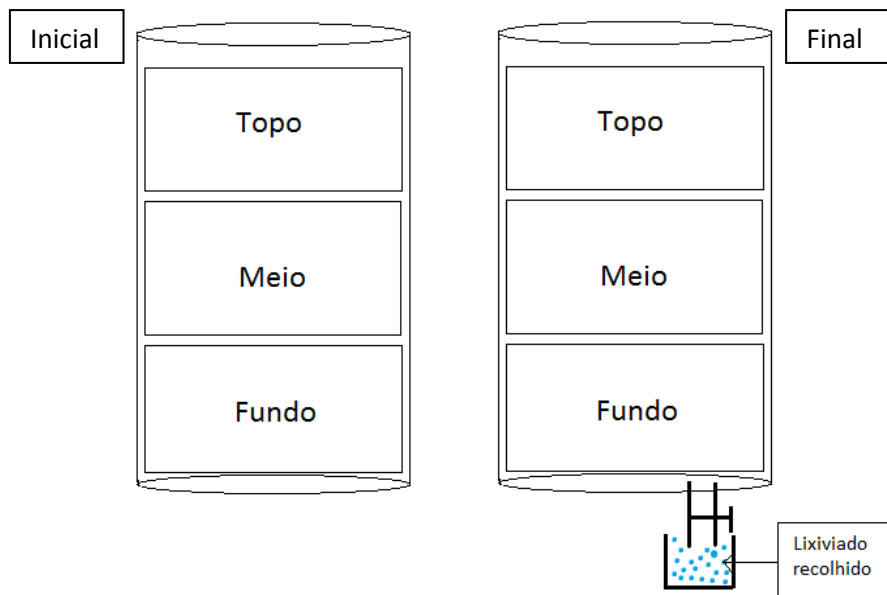


Figura 21 - Esquema das colunas nos estados inicial e final do teste de lixiviação

4.2.2.1. Condutividade e pH

A condutividade foi determinada através de uma extração aquosa realizada às diferentes camadas de solo: topo, meio e fundo. O pH foi obtido por duas extrações diferentes: aquosa e com uma solução de cloreto de potássio, também às três camadas nas quais se dividiu o solo. Na figura 21 são apresentados os resultados de pH para a extração aquosa e para a extração com cloreto de potássio, e a condutividade, para ambas as réplicas das colunas solo referência.

Na figura 22 podem observar-se os valores de pH, de ambas as extrações realizadas ao solo das colunas solo de referência, às quais não foi aplicado nenhum material, à exceção da água. É possível observar que o pH do solo final é ligeiramente mais elevado que o pH do solo inicial, sendo a diferença entre o solo inicial e final bastante semelhante em ambas as extrações. Observa-se ainda que o pH obtido para a extração com KCl é inferior ao obtido pela extração aquosa cerca de 1 valor, em todos os valores.

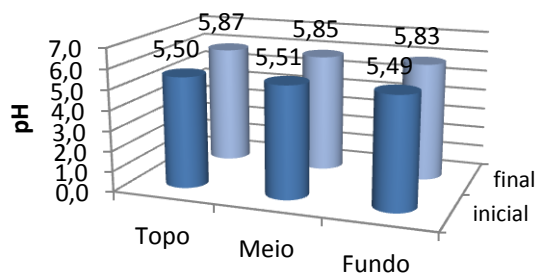


Ilustração 193) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna solo referência, réplica #1

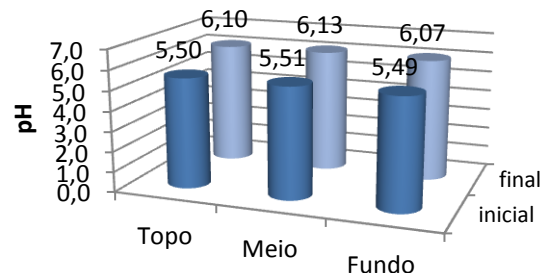


Ilustração 194) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna solo referência, réplica #2

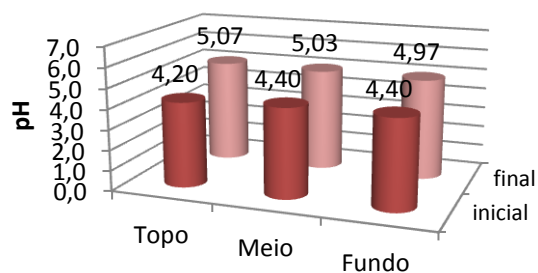


Ilustração 195) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna solo referência, réplica #1

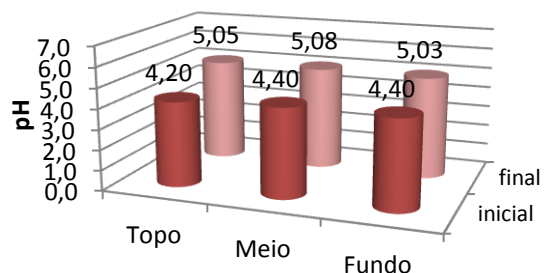


Ilustração 196) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna solo referência, réplica #2

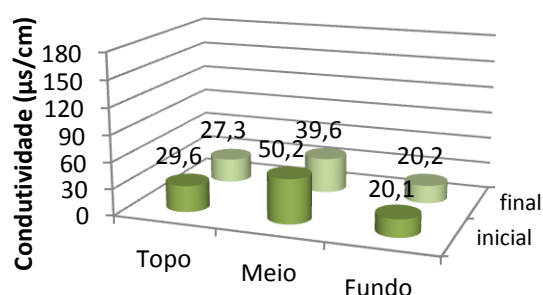


Ilustração 197) - Valores de condutividade para a coluna solo referência, réplica #1

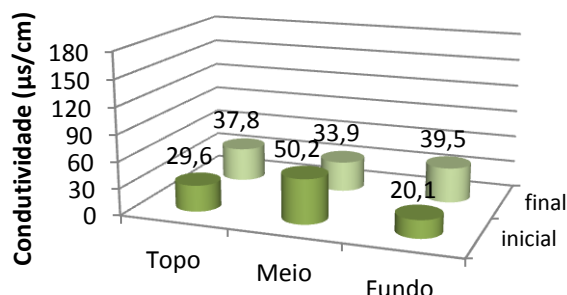


Ilustração 198) - Valores de condutividade para a coluna solo referência, réplica #2

Figura 22 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas solo referência

Relativamente à condutividade, para a camada do meio de ambas as réplicas, observa-se uma diminuição da condutividade do solo inicial para o solo final. Para as restantes camadas da réplica #1 a condutividade mantém-se relativamente constante, e para as restantes camadas da réplica #2, observa-se um aumento da condutividade. O que seria de esperar, uma vez que não houve a adição de nenhuma substância ao solo, era que a condutividade se mantivesse constante ao longo do tempo, podendo sofrer ligeiras variações. Verifica-se um comportamento mais próximo do esperado para réplica #1, tendo em conta os valores obtidos para ambas as réplicas.

Para as colunas cinza determinou-se o pH e a condutividade. O pH foi obtido através da extração aquosa e através da extração com uma solução de cloreto de potássio e a condutividade através da extração aquosa. Os resultados de ambas as réplicas das colunas cinza são apresentados na figura 23.

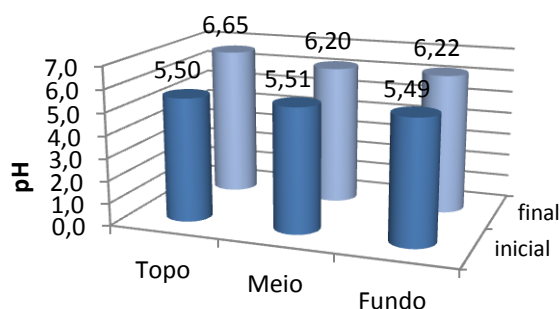


Ilustração 199) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna cinza, réplica #1

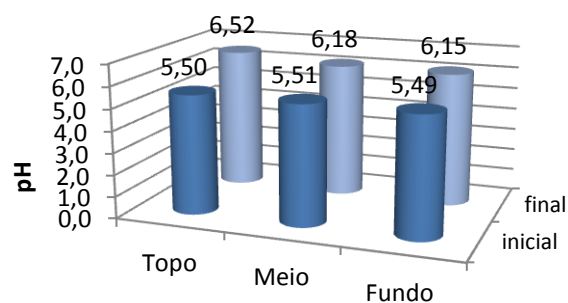


Ilustração 200) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna cinza, réplica #2

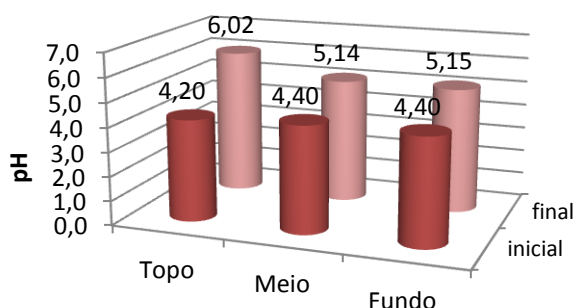


Ilustração 201) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna cinza, réplica #1

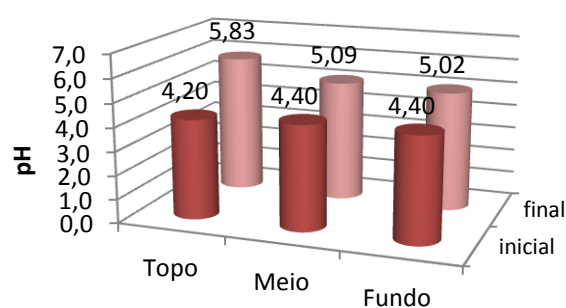


Ilustração 202) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna cinza, réplica #2

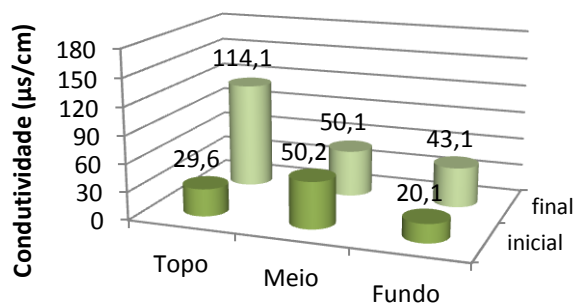


Ilustração 203) - Valores de condutividade para a coluna cinza, réplica #1

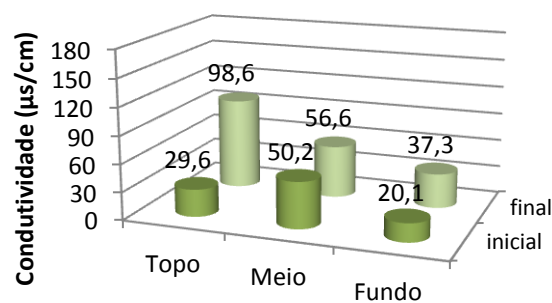


Ilustração 204) - Valores de condutividade para a coluna cinza, réplica #2

Figura 23 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas cinza

Para a extração aquosa observamos um aumento no valor de pH, atingindo os 6,65 para a camada topo da réplica #1 e os 6,52 para a camada topo da réplica #2, verificando-se um aumento acentuado do pH do solo inicial para o solo final. Ainda mais acentuado é o aumento observado no pH obtido através da extração com KCl, principalmente para a réplica #1 na camada topo, onde

se verifica um aumento de pH do solo inicial para o solo final de cerca de 1,80. Para a réplica #2 o aumento é da ordem do 1,60 no valor de pH na camada do topo. Para as restantes camadas o aumento verificado não é tão acentuado. O aumento de pH na camada do topo, para ambas as extrações, deve-se à aplicação da cinza de biomassa nesta mesma camada, uma vez que a cinza de biomassa utilizada apresenta um pH na ordem dos 12,5. Isto vai provocar um aumento de pH maior na camada onde foi aplicada, e um aumento de pH menos acentuado nas restantes camadas. Assim, podemos observar que a cinza de biomassa influencia bastante o valor de pH do solo, principalmente para a camada do topo, combatendo a acidificação do mesmo. Para estas colunas onde foi aplicada cinza de biomassa, foi onde se obteve os valores de pH mais elevados.

Para ambas as réplicas analisadas na figura anterior, a condutividade na camada do topo sofreu um aumento bastante acentuado, atingindo valores na réplica #1 de 114,1 e na réplica #2 de 98,6. Para a camada do meio a condutividade manteve-se relativamente constante, e para a camada do fundo observou-se um ligeiro aumento. Assim verifica-se também a influência da cinza de biomassa na condutividade da camada onde esta foi aplicada.

Na figura 24 são apresentados os resultados de pH para a extração aquosa e para a extração com uma solução de cloreto de potássio, e a condutividade para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , determinada através da extração aquosa.

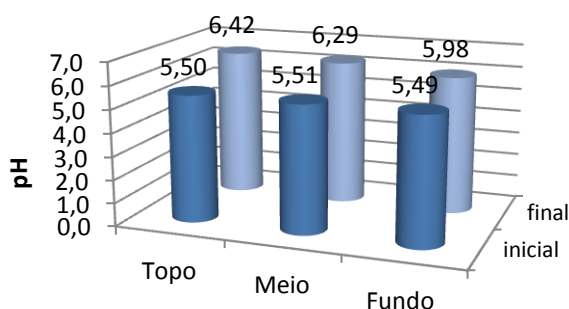


Ilustração 205) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna CaCO_3 , réplica #1

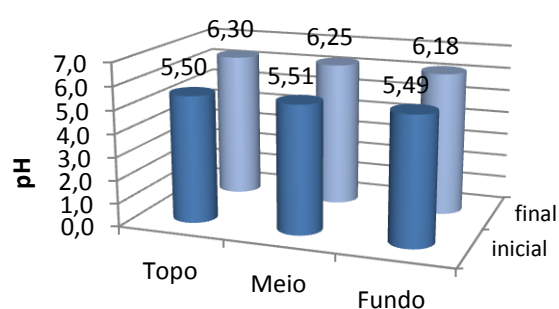


Ilustração 206) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna CaCO_3 , réplica #2

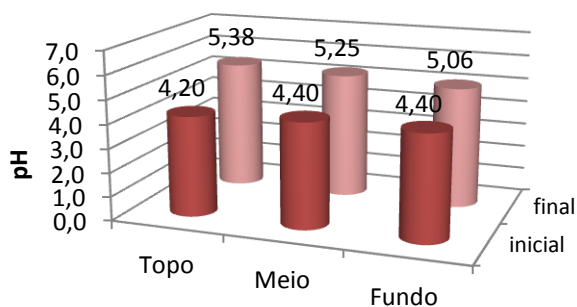


Ilustração 207) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna CaCO_3 , réplica #1

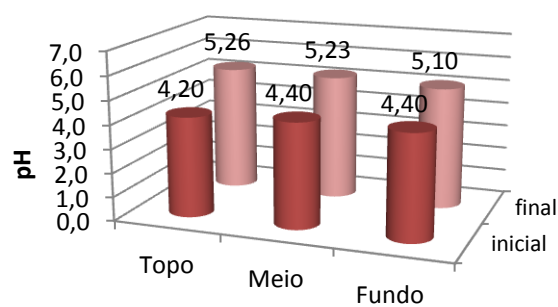


Ilustração 208) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna CaCO_3 , réplica #2

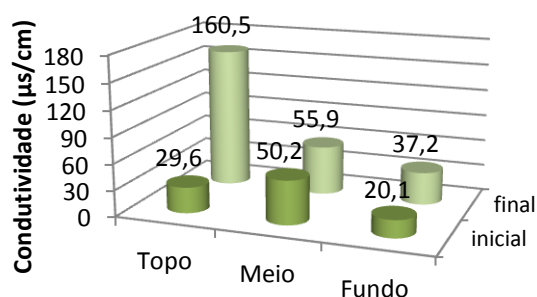


Ilustração 209) - Valores de condutividade para a coluna CaCO_3 , réplica #1

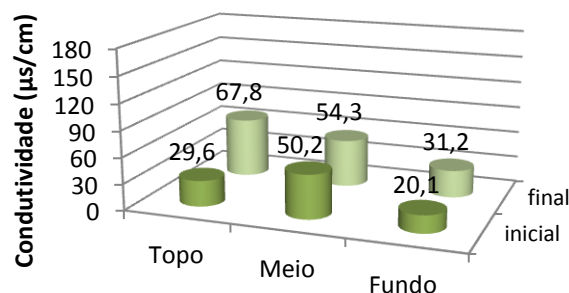


Ilustração 210) - Valores de condutividade para a coluna CaCO_3 , réplica #2

Figura 24 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas CaCO_3

Nas colunas onde foi aplicado carbonato de cálcio, registou-se um forte aumento do pH em ambas as extrações, mas não tão acentuado como no caso das colunas onde foi aplicada cinza de biomassa. Na extração aquosa, as duas réplicas atingiram valores de pH por volta dos 6,40 e 6,30. Para a extração com cloreto de potássio o aumento foi claramente menor do que nas colunas com cinza. O pH aumentou cerca de 1,00 a 1,10 para a camada topo, e menos de 1,00 para as restantes camadas.

Relativamente à condutividade, observa-se um aumento brusco na camada do topo para a réplica #1, não se encontrando nenhuma explicação para o sucedido, uma vez que a na réplica #2 o valor obtido para a condutividade na camada do topo foi cerca de metade que o obtido para a réplica #1. Para as restantes camadas verificou-se apenas aumentos ligeiros na condutividade.

A determinação o pH e da condutividade de ambas as réplicas para as colunas cinza + lama são apresentadas na figura 25. São apresentados os resultados de pH para a extração aquosa e para a extração com uma solução de cloreto de potássio, e a condutividade, para ambas as réplicas das colunas cinza + lama.

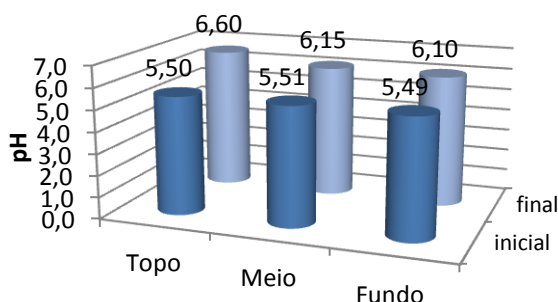


Ilustração 211) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna cinza + lama, réplica #1

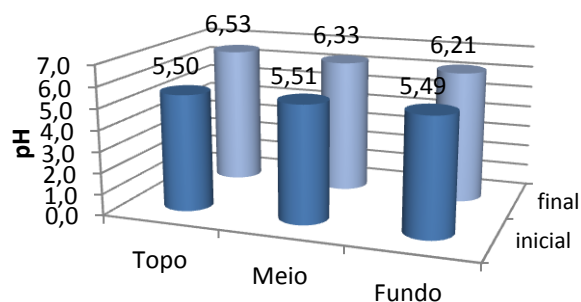


Ilustração 212) - Valores de pH através de extração aquosa para a coluna cinza + lama, réplica #2

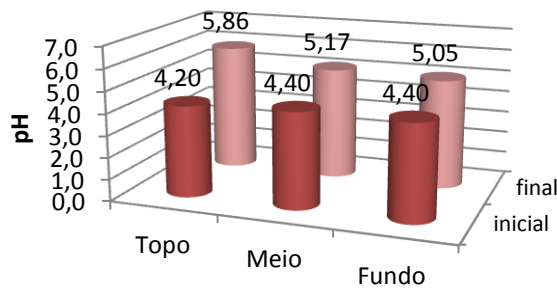


Ilustração 213) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna cinza + lama, réplica #1

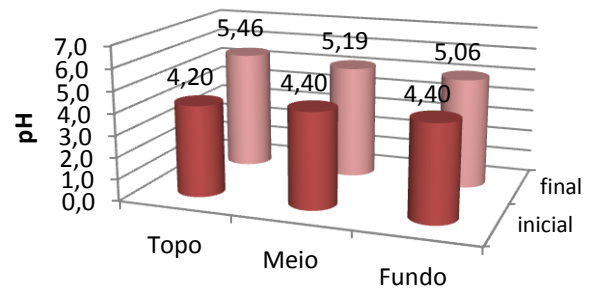


Ilustração 214) - Valores de pH através de extração com KCl para a coluna cinza + lama, réplica #2

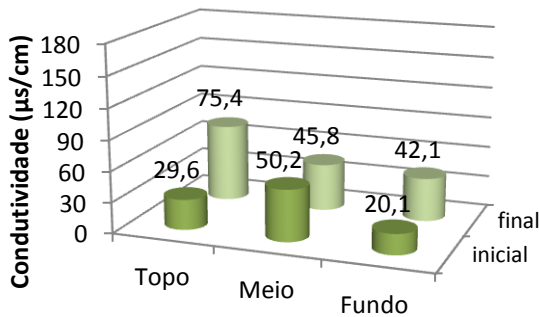


Ilustração 215) - Valores de condutividade para a coluna cinza + lama, réplica #1

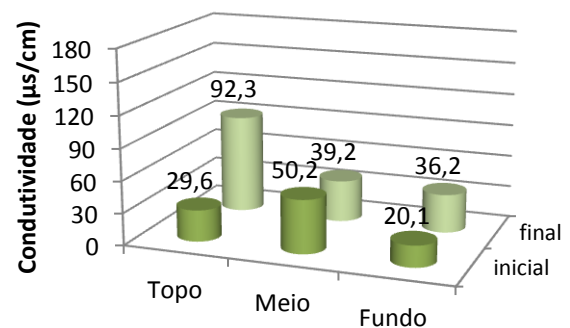


Ilustração 216) - Valores de condutividade para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 25 - Valores obtidos de pH e condutividade para as colunas cinza + lama

O pH das réplicas apresentadas na figura anterior sofreu um claro aumento do solo inicial para o solo final na extração com KCl, para a camada topo. Para esta mesma camada pela extração aquosa, observa-se um aumento do pH do início para o final de um pouco mais de 1,0 valor. O aumento do pH também foi observado nas outras camadas para ambas as extrações, mas com uma variação mais ligeira. Este aumento do pH mais acentuado na camada topo, mostra a influência da aplicação da cinza e da lama no pH do solo, uma vez que estas foram aplicadas precisamente nesta camada.

Para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, observa-se um grande aumento na condutividade da camada do topo do solo inicial para o solo final, o que deriva da aplicação da cinza e da lama nesta mesma camada. Observa-se também um ligeiro aumento na camada do fundo, não tao acentuado com o anterior. Para a camada do meio verifica-se uma diminuição da condutividade, mas não muito acentuada.

4.2.2.2. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas referência, extração aquosa

Para caracterizar as colunas no seu estado inicial e final, após decorrido o período de lixiviação (50 dias), contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo (ver figura 21).

A apresentação gráfica encontra-se nas figuras 26 a 36 e está organizada de forma que na primeira coluna da esquerda se encontre a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2.

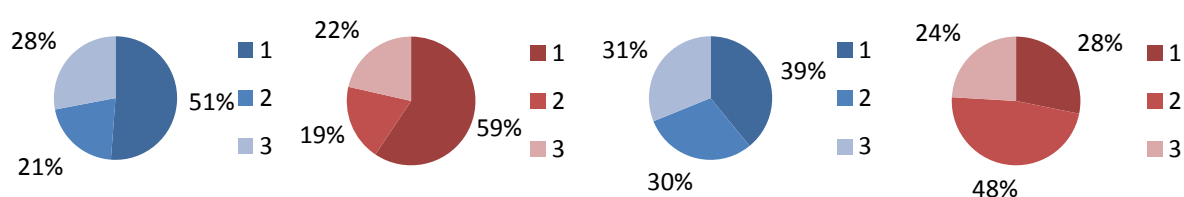


Figura 26 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

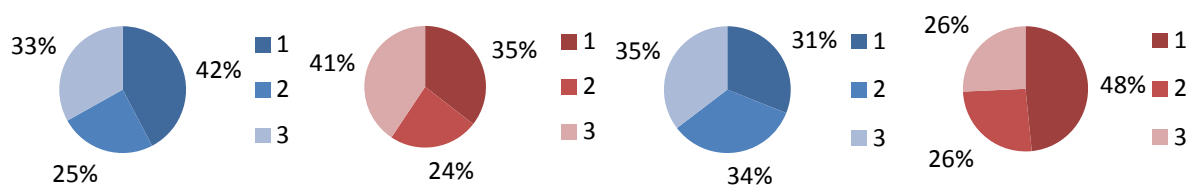


Figura 27 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

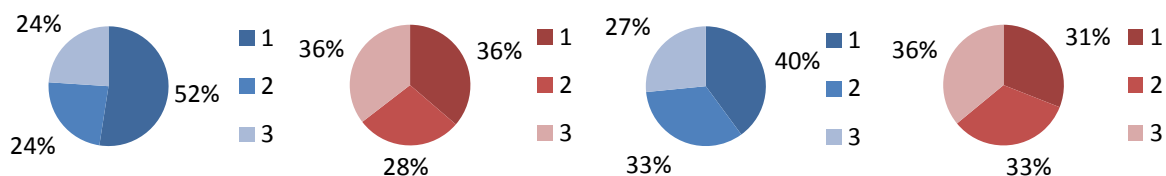


Figura 28 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

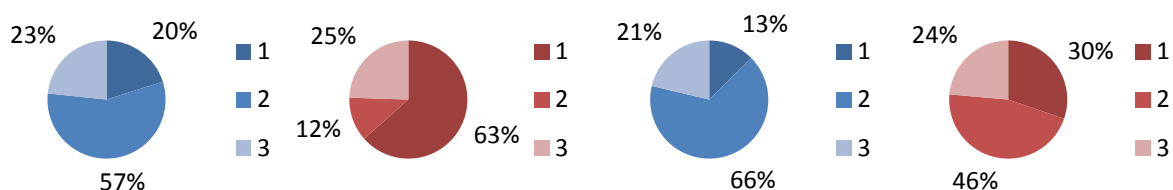


Figura 29 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

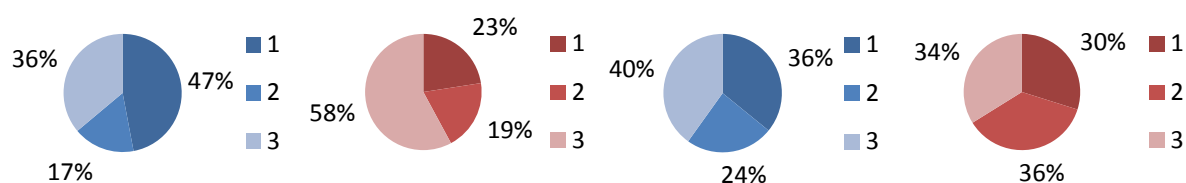


Figura 30 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

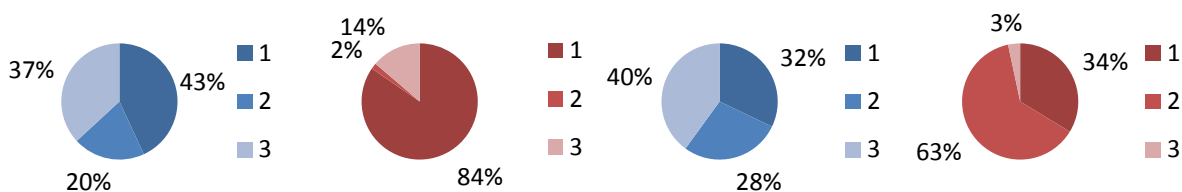


Figura 31 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

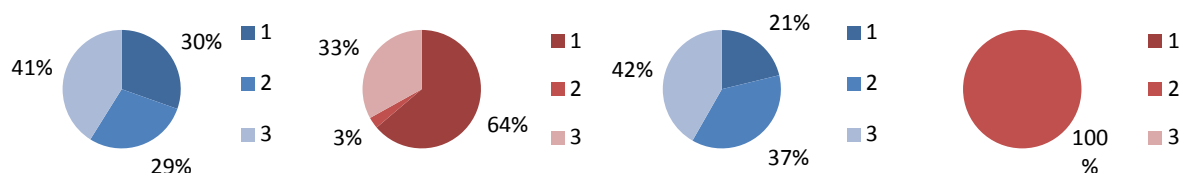


Figura 32 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

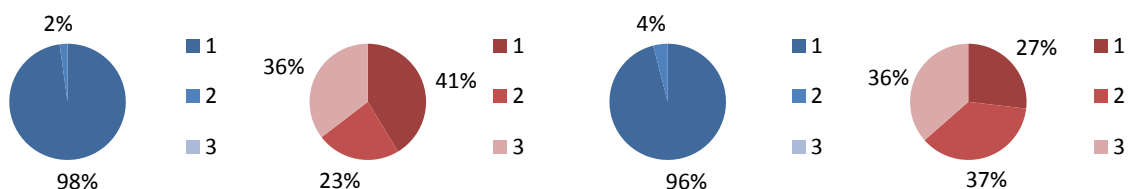


Figura 33 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

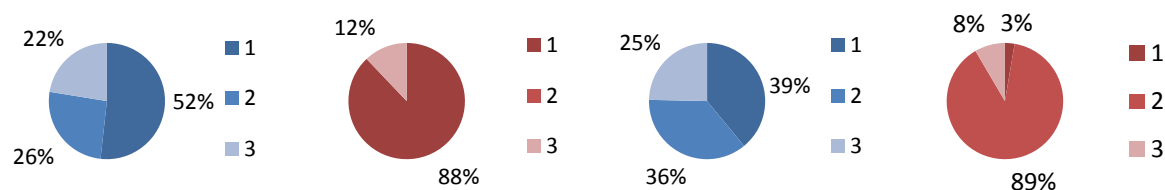


Figura 34 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

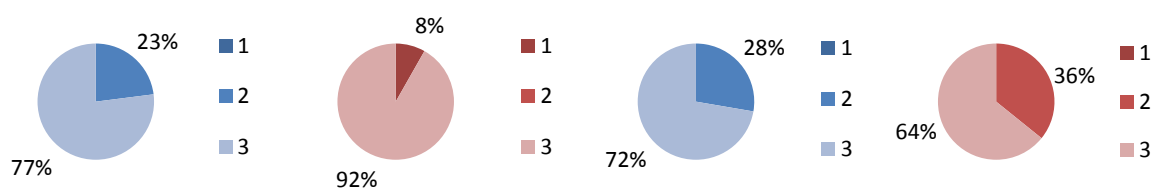


Figura 35 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

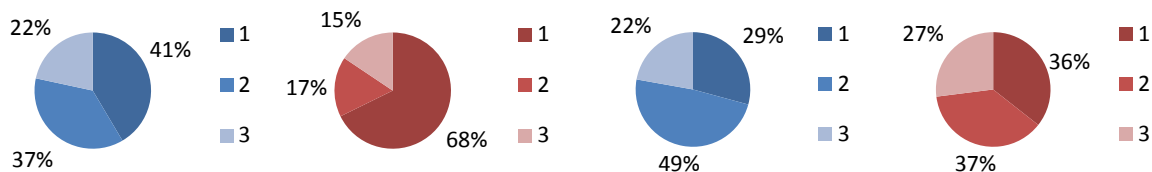


Figura 36 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

Não foi detetadas a presença de níquel nem no solo inicial nem no solo final através da extração aquosa. Não foi também detetada a presença de crómio no solo final através desta extração. Para a generalidade dos elementos observa-se uma distribuição uniforme pelas três camadas, sendo que para o solo inicial em alguns casos a distribuição é superior na camada do topo. Verificam-se algumas exceções como é o caso do ferro, onde a distribuição no solo final incide principalmente nas camadas do meio e do fundo, o manganês, que no solo final a distribuição da réplica #1 incide na camada do topo e do fundo e na réplica #2 está apenas presente na camada do meio. É ainda de referir o caso do cobre que no solo inicial está presente essencialmente na camada do topo, o caso do zinco que no solo final se distribui principalmente pelas duas camadas superiores, e o cádmio que apresenta uma distribuição no solo inicial apenas nas duas camadas inferiores com maior incidência na camada do fundo e no solo final encontra-se em maior percentagem na camada do fundo. Estas exceções e distribuições mais irregulares podem dever-se ao facto destes elementos se encontrarem em quantidades baixas ou muito baixas no solo, não sendo possível obter uma distribuição totalmente correta destes elementos pelo perfil de solo. A análise das figuras 26 a 36 permite afirmar que os diferentes elementos analisados apresentam diferentes padrões de distribuição e mobilidade ao longo do perfil do solo.

4.2.2.3. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza, extração aquosa

Para as colunas no estado inicial contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo. Optou-se por não incluir a massa de elemento presente no material adicionado, para a distribuição dos elementos pelo perfil no estado inicial. Para as colunas no estado final, contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo após o período de lixiviação (50 dias), ver figura 21.

A representação gráfica do efeito da aplicação de cinza no solo, na distribuição de elementos ao longo do perfil, encontra-se nas figuras 37 a 47. Está organizada de forma que na primeira coluna da esquerda se encontre a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a

distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2.

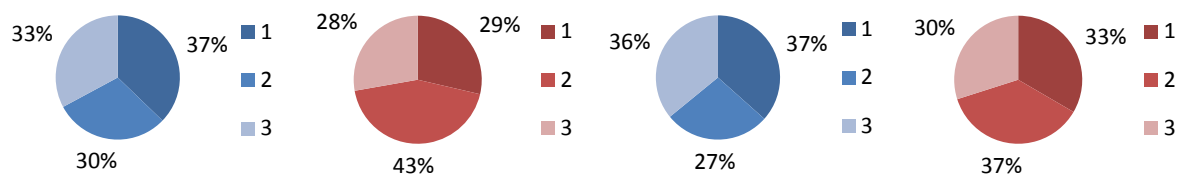


Figura 37 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

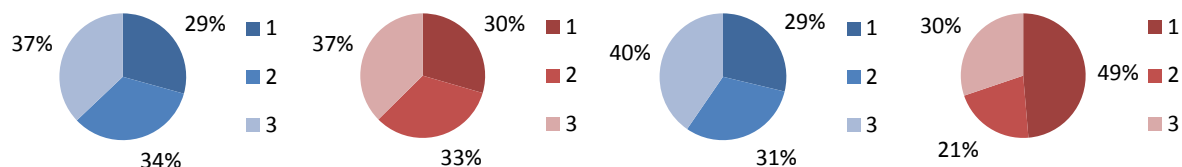


Figura 38 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

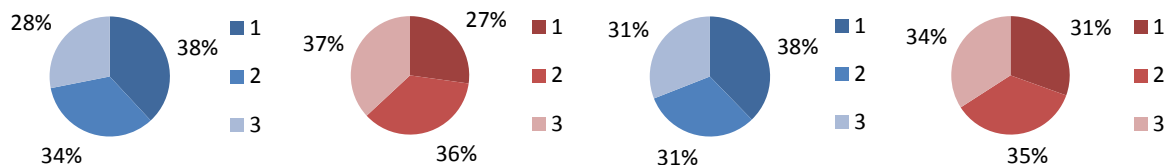


Figura 39 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

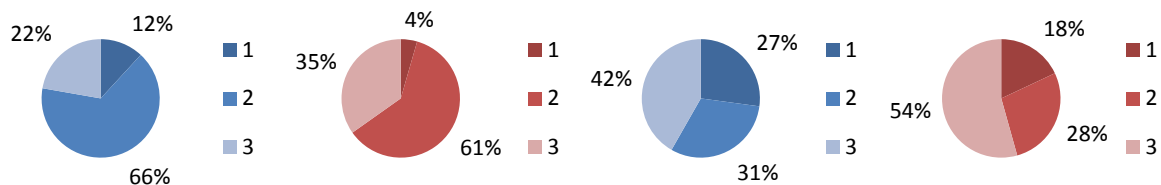


Figura 40 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

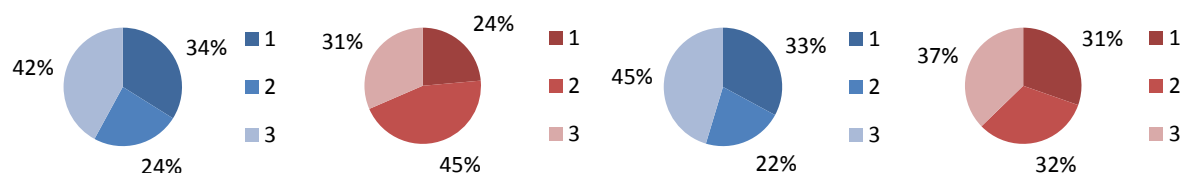


Figura 41 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

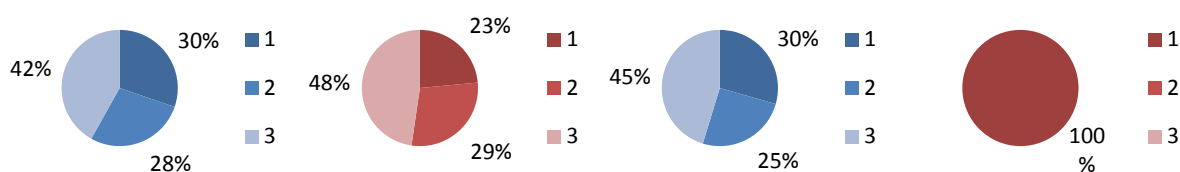


Figura 42 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

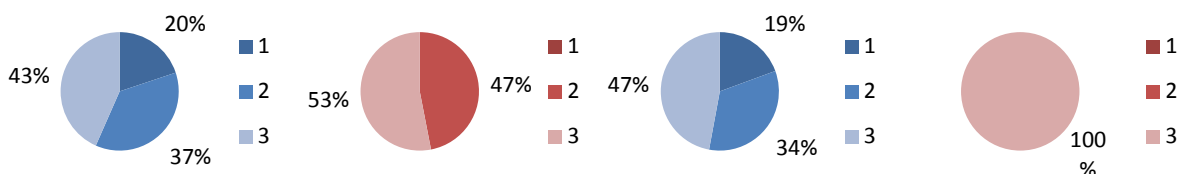


Figura 43 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

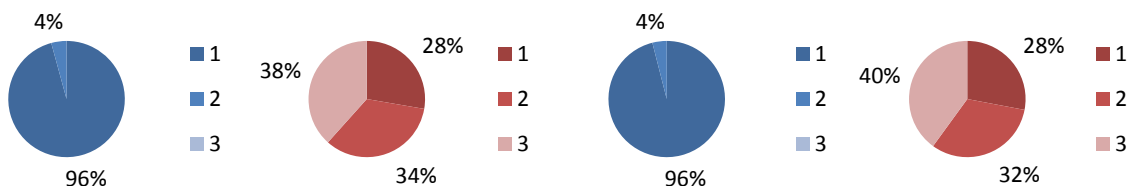


Figura 44 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

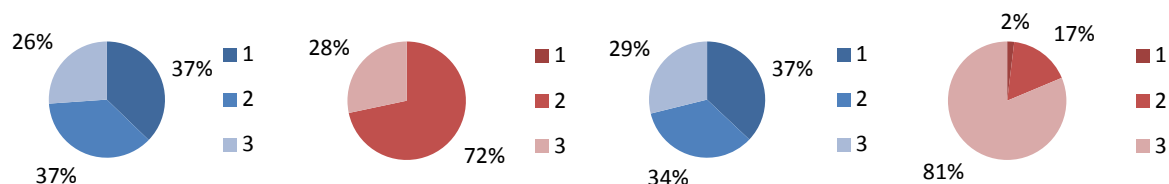


Figura 45 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

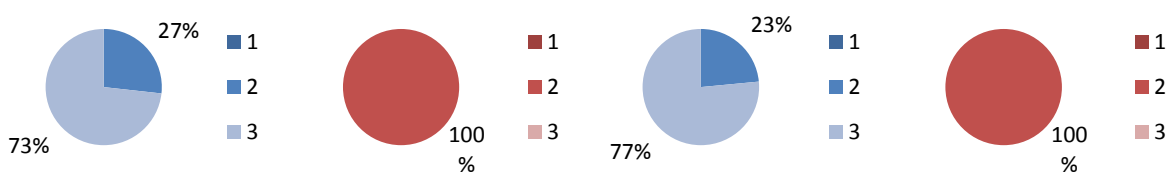


Figura 46 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

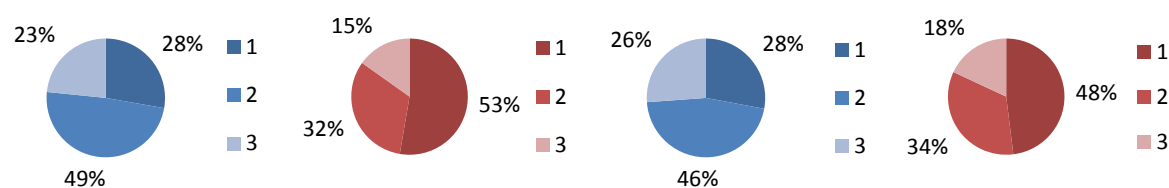


Figura 47 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

Não foi detetadas a presença de níquel nem no solo inicial nem no solo final através da extração aquosa. Não foi também detetada a presença de crómio no solo final através desta extração. Pela análise dos gráficos anteriores observa-se uma distribuição uniforme do fósforo, cálcio, magnésio, potássio e nitratos pelas três camadas do perfil, algumas delas com uma percentagem um pouco superior na camada do topo. Para o sódio verifica-se uma exceção na réplica #1, para o solo final, onde este se distribui apenas pelas duas camadas inferiores. Para o caso do ferro a diferença ocorre na réplica #1 onde se observa a distribuição deste elemento, para o solo final, apenas pela camada do topo. Também no caso do manganês se deteta uma distribuição não uniforme em ambas as réplicas para o solo final, onde, na réplica #1 a distribuição incide apenas nas duas camadas inferiores e na réplica #2 se distribui apenas pela camada do fundo. Relativamente ao cobre, no solo inicial distribui-se essencialmente na camada do topo, distribuindo-se uniformemente no solo final em ambas as réplicas. No caso do zinco, este distribui-se uniformemente no solo inicial, e no solo final incide essencialmente nas camadas inferiores. Por último o cádmio, que apresenta uma distribuição no solo inicial apenas nas últimas duas camadas e no solo final distribui-se na totalidade na camada do meio. No caso dos metais pesados a distribuição irregular pode dever-se a estes estarem presentes no solo em pequenas quantidades, podendo não ser detetados na totalidade, ou seja, a distribuição pode não ser totalmente correta. Genericamente (salvo as exceções referidas), pode-se dizer que o padrão de distribuição e mobilidade dos elementos no solo, não foi alterado pelo facto de se aplicar cinza no topo da coluna.

4.2.2.4. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de CaCO_3 , extração aquosa

Para as colunas no estado inicial contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo. Optou-se por não contabilizar a massa de elemento presente no material adicionado, para a distribuição dos elementos pelo perfil no estado inicial. Para as colunas no estado final, contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo após o período de lixiviação (50 dias), ver figura 21.

A apresentação gráfica do efeito da aplicação de CaCO_3 no solo, na distribuição de elementos ao longo do perfil, encontra-se nas figuras 48 a 58. Está organizada de forma que na primeira coluna da esquerda se encontre a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2, apresentando-se os resultados da figura 48 à 58.

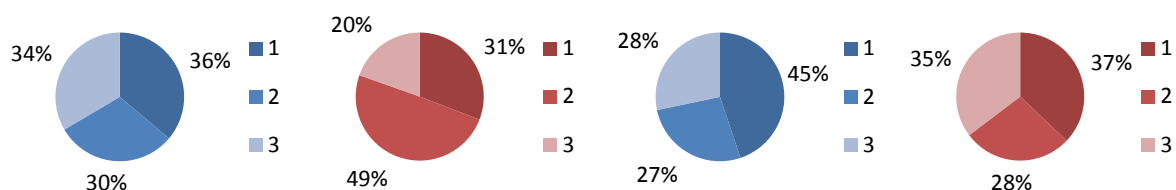


Figura 48 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

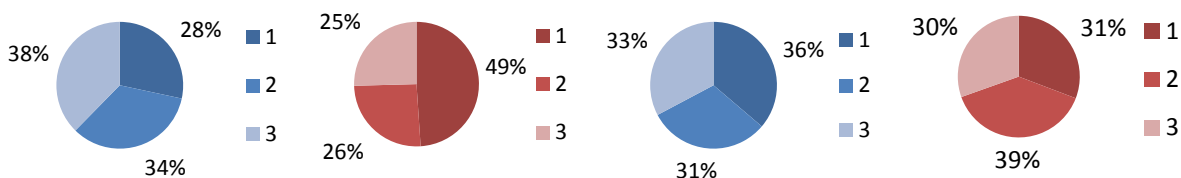


Figura 49 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

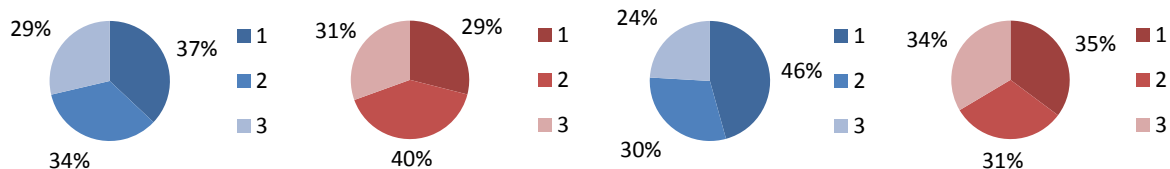


Figura 50 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

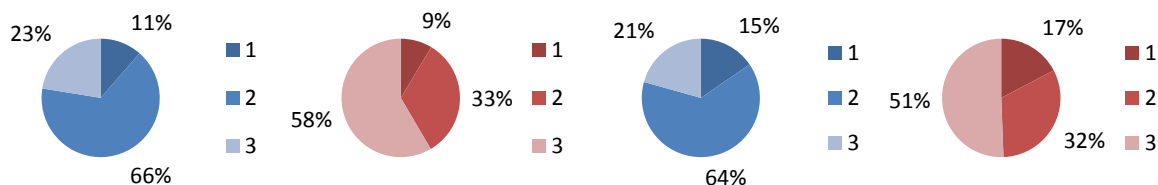


Figura 51 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

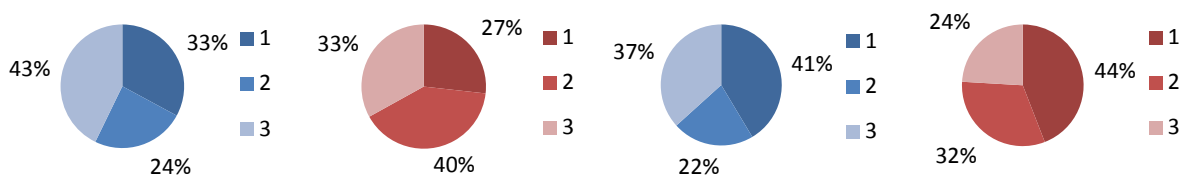


Figura 52 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

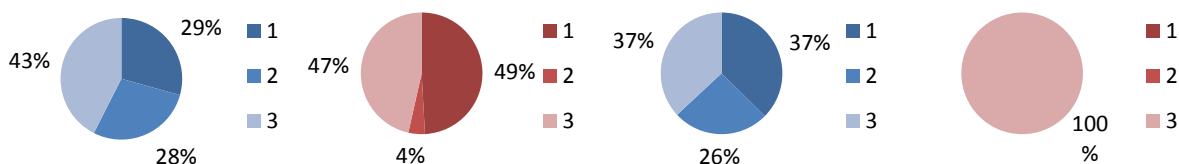


Figura 53 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

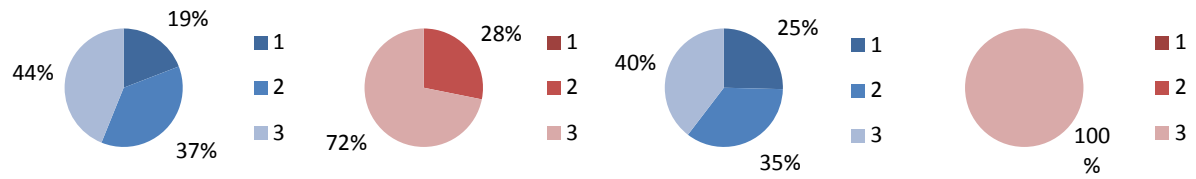


Figura 54 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

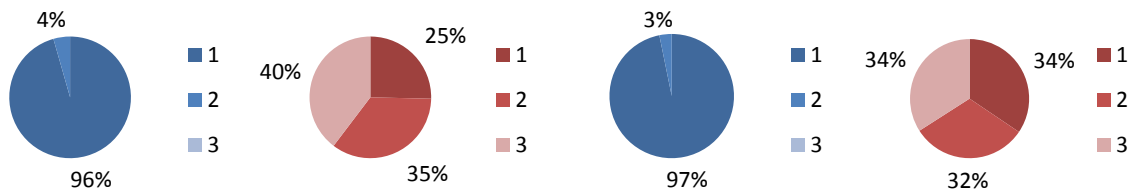


Figura 55 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

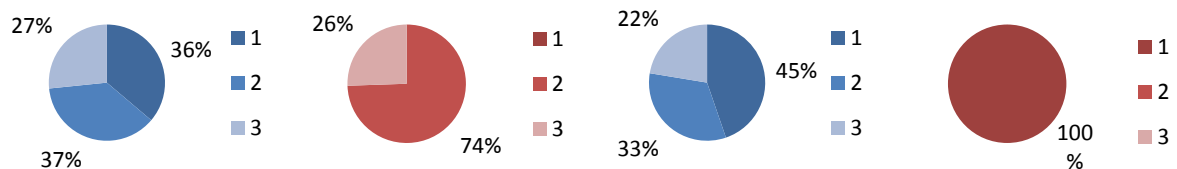


Figura 56 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

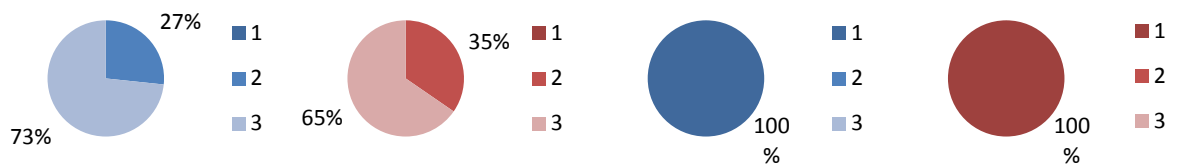


Figura 57 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

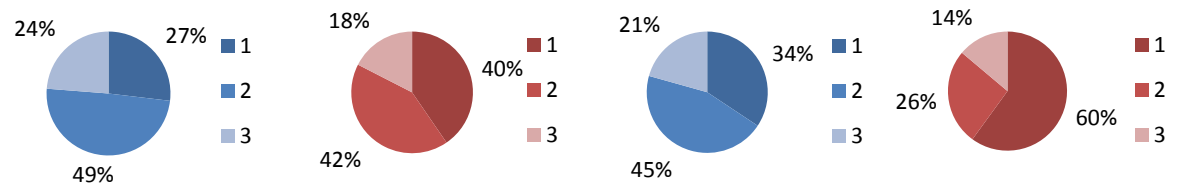


Figura 58 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

Não foi detetada a presença de níquel nem no solo inicial nem no solo final através da extração aquosa. Não foi também detetada a presença de crómio no solo final através desta extração. Os elementos que se distribuem uniformemente pelas três camadas do perfil são o fósforo, o cálcio,

o magnésio, o potássio e os nitratos. Relativamente ao sódio, para ambas as réplicas, no solo inicial, distribui-se pelas três camadas mas com percentagem mais acentuada na camada do meio, e no solo final essencialmente pelas duas camadas inferiores. No que respeita ao ferro verifica-se uma distribuição uniforme no caso do solo inicial para ambas as réplicas, e para o solo final a réplica #1 distribui-se, maioritariamente, pelas camadas topo e fundo e na réplica #2 apenas se encontra na camada do fundo. Nos metais pesados observam-se distribuições muito variadas, para o caso do manganês a distribuição do solo final verifica-se apenas nas duas camadas inferiores para a réplica #1 e na camada do fundo para a réplica #2. O cobre no solo inicial, tal como nas colunas anteriores, distribui-se maioritariamente na camada do topo sendo que no solo final apresenta uma distribuição uniforme nas três camadas do perfil. Para o zinco observa-se uma distribuição uniforme no solo inicial, no entanto, no solo final para a réplica #1 está presente apenas nas duas camadas inferiores e para a réplica #2 encontra-se apenas na camada do fundo. Por último o cádmio apresenta uma distribuição semelhante no solo inicial e no solo final encontrando-se, na réplica #1, nas camadas do meio e do fundo, e na réplica #2 apenas se observa na camada do topo. A distribuição irregular que ocorre no caso dos metais pesados pode dever-se a este se encontrarem em baixas quantidades, tanto no solo inicial como no solo final, não sendo totalmente fiável a distribuição apresentada. Genericamente (salvo as exceções referidas), pode-se dizer que o padrão de distribuição e mobilidade dos elementos no solo, não sofreu grande alteração pelo facto de se aplicar CaCO_3 no topo da coluna e apresenta-se bastante semelhante ao observado com a aplicação de cinza.

4.2.2.5. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza + lama, extração aquosa

Para as colunas no estado inicial contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo. Optou-se por não contabilizar a massa de elemento presente no material adicionado, para a distribuição dos elementos pelo perfil no estado inicial. Para as colunas no estado final, contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo após o período de lixiviação (50 dias), ver figura 21.

A apresentação gráfica do efeito da aplicação de cinza + lama no solo, na distribuição de elementos ao longo do perfil, encontra-se nas figuras 59 a 69. Está organizada de forma que na primeira coluna se observa a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2, apresentando-se os resultados da figura 59 à 69.

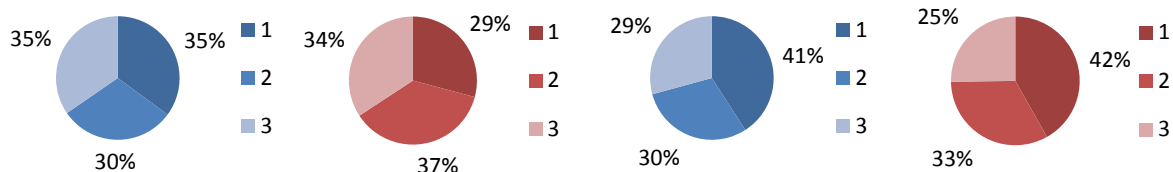


Figura 59 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

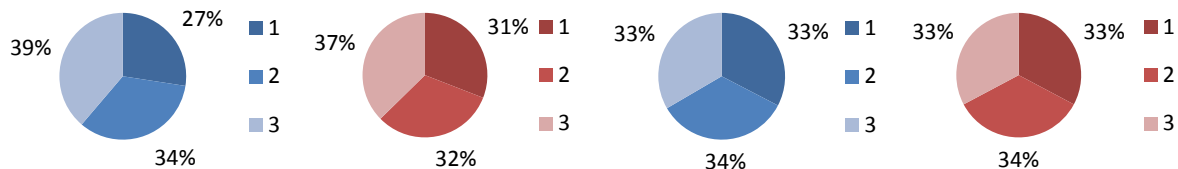


Figura 60 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

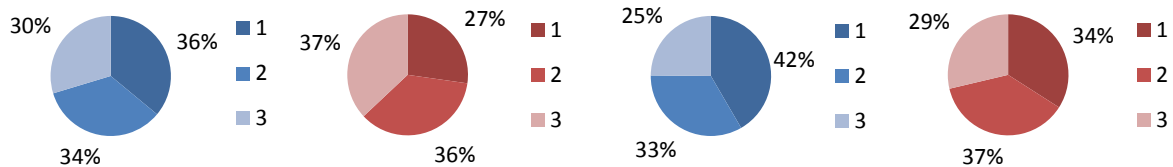


Figura 61 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

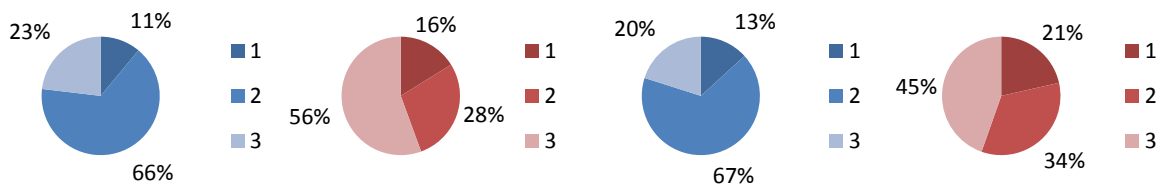


Figura 62 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

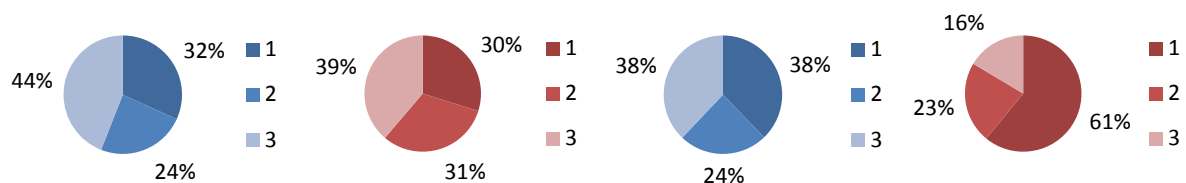


Figura 63 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

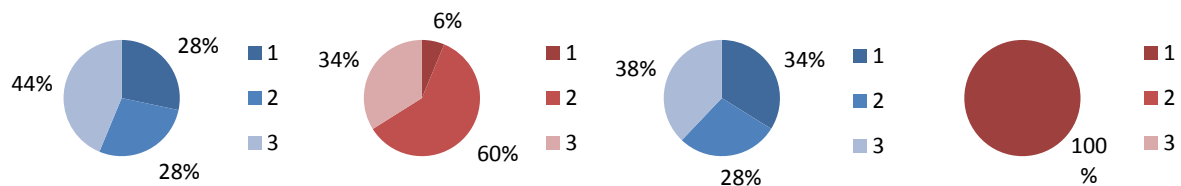


Figura 64 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

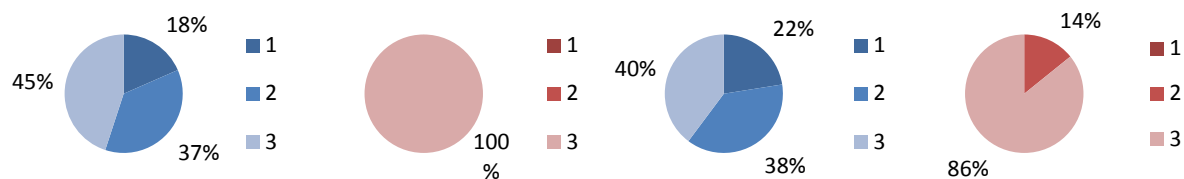


Figura 65 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

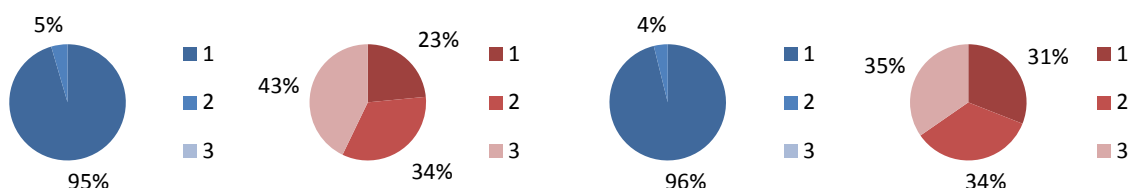


Figura 66 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

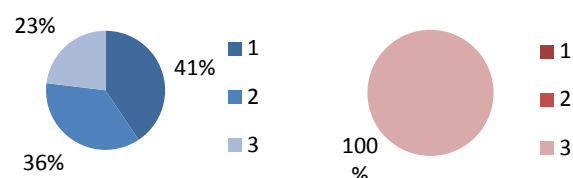


Figura 67 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

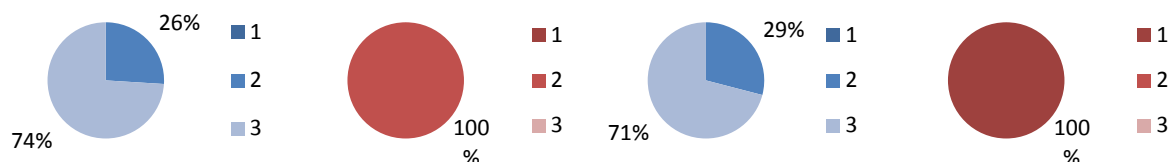


Figura 68 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

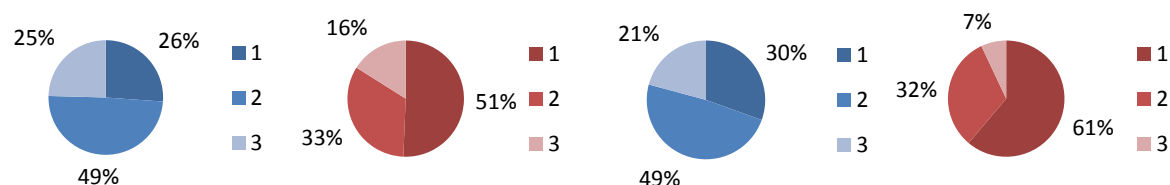


Figura 69 - Valores da distribuição de nitratos no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração aquosa (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

Para a réplica #1 destas colunas não se observa a presença de zinco no solo final, e para a réplica #2, no solo final a distribuição é uniforme e no solo final encontra-se apenas na camada do fundo. Não foi detetada a presença de níquel nem no solo inicial nem no solo final através da extração

aquosa. Não foi também detetada a presença de crómio no solo final através desta extração. A distribuição do fósforo, do cálcio, do magnésio e dos nitratos é considerada uniforme para as três camadas do perfil. No caso do sódio a distribuição do mesmo no solo inicial para ambas as réplicas incide maioritariamente na camada do meio, e para o solo final nas duas camadas inferiores, para o ferro a distribuição no solo inicial mostra-se uniforme, e no solo final, para a réplica #1 incide nas camadas inferiores, e para a réplica #2 encontra-se essencialmente na camada do topo. Relativamente aos metais pesados, no que respeita ao manganês a distribuição no solo inicial ocorre nas camadas do meio e do fundo e para o solo final ocorre na réplica #1 na camada do fundo e na réplica #2 nas duas camadas inferiores. Relativamente ao cobre, no solo inicial distribui-se, quase na totalidade, pela camada do topo e no solo final a sua distribuição apresenta-se uniforme e no caso do cádmio, no solo inicial a sua distribuição incide nas duas camadas inferiores, no solo final para a réplica #1 verifica-se a sua presença apenas na camada do meio e na réplica #2 apenas na camada do fundo. Pode desta forma dizer-se que o padrão de distribuição e mobilidade dos elementos no solo não sofreu grande alteração pelo facto de se aplicar cinza + lama no topo da coluna e apresenta-se bastante semelhante ao observado nas colunas com aplicação de cinza ou aplicação de CaCO_3 , à exceção dos elementos ferro e zinco, que passam a localizar-se principalmente na camada do fundo.

4.2.2.6. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas referência, extração de Mehlich

O solo das colunas foi alvo de uma caracterização, resultante da aplicação de um diferente método de extração, após decorrido o período de lixiviação (50 dias). Mais uma vez contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo no seu estado inicial e final (ver figura 21). A apresentação gráfica é realizada nas figuras 70 a 79 apresentando-se na primeira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2.

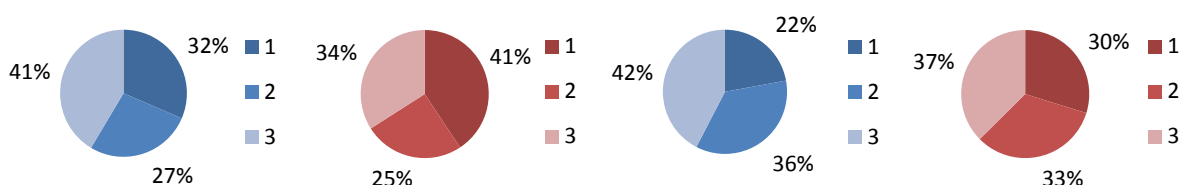


Figura 70 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

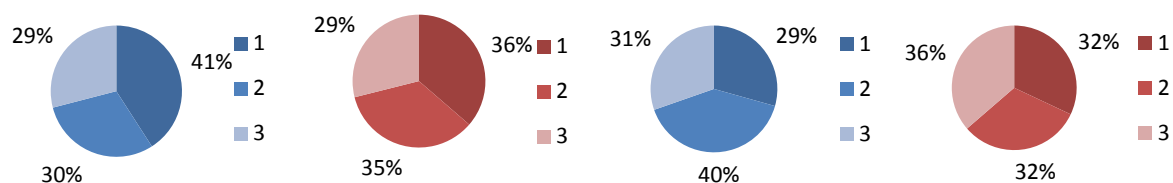


Figura 71 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

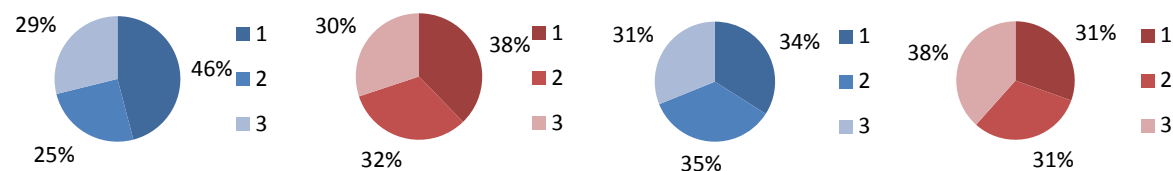


Figura 72 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

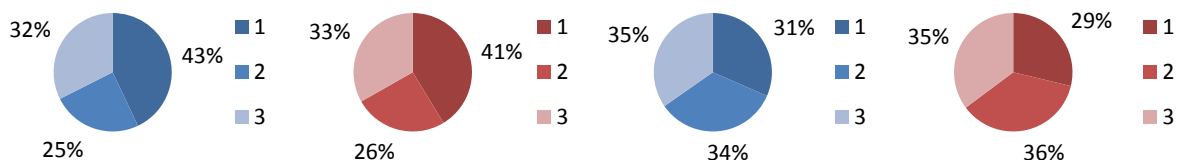


Figura 73 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

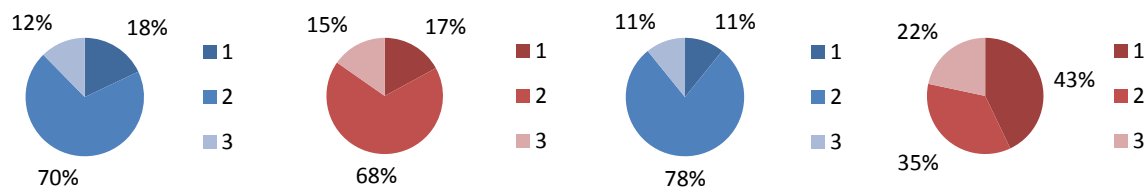


Figura 74 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

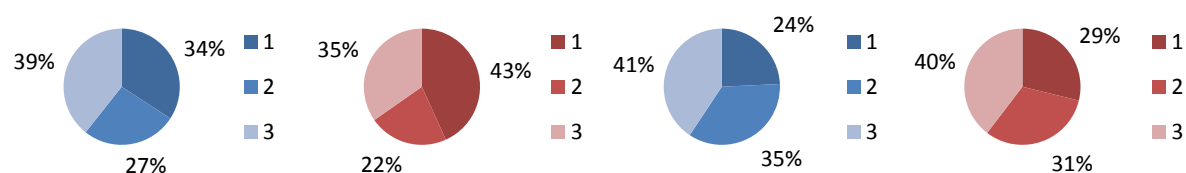


Figura 75 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

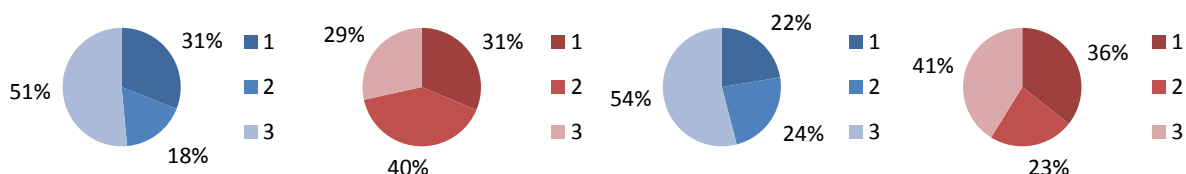


Figura 76 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

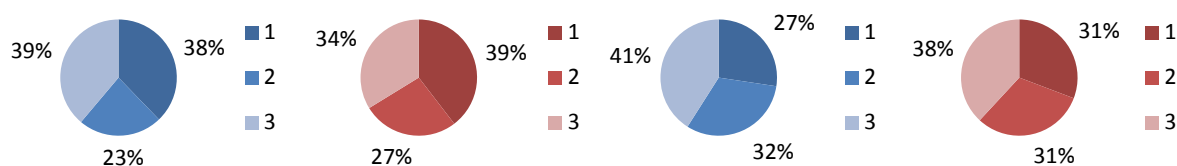


Figura 77 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

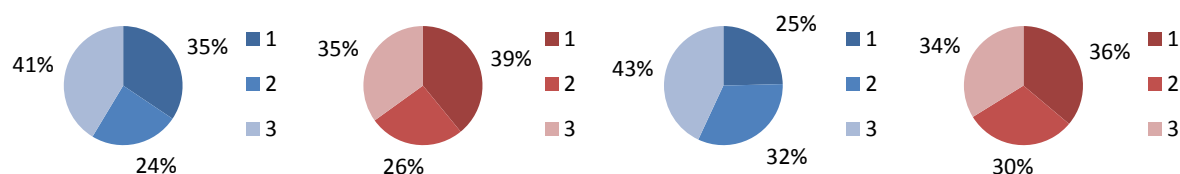


Figura 78 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

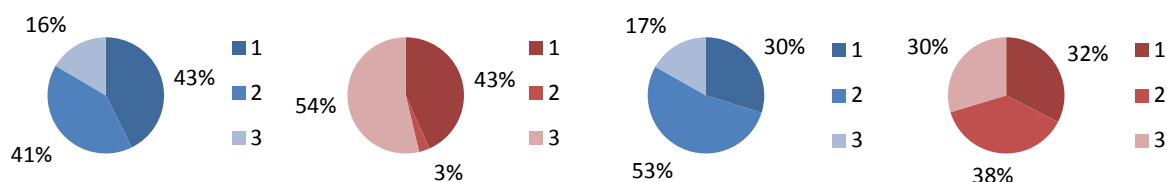


Figura 79 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas solo referência, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

O níquel e o crómio apenas são detetados para o solo inicial não se observando nenhuma massa destes elementos no solo final através da extração de Mehlich. A maior parte dos elementos apresenta uma distribuição essencialmente uniforme, tal como o fósforo, o cálcio, o magnésio, o sódio, o ferro, o cobre e o zinco. Uma das exceções que se verifica e apresenta uma distribuição irregular é o caso do potássio, para o qual, em ambas as réplicas, a sua distribuição no solo inicial incide principalmente na camada do meio assim como para o solo final na réplica #1, e no solo final para a réplica #1 se observa uma distribuição uniforme. No caso do manganês, para o solo final a distribuição mostra-se uniforme em ambas as réplicas, e para o solo inicial a distribuição incide na camada do fundo sendo que as outras camadas apresentam uma percentagem bastante menor mas uniforme. Por último apresentam-se os resultados do cádmio onde se observa uma distribuição no solo inicial essencialmente nas camadas do topo e do meio, e para o solo final, no caso da réplica #1 incide na camada do topo e do fundo, apresentando-se a distribuição da réplica #2 uniforme para este elemento.

4.2.2.7. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza, extração de Mehlich

O solo das colunas foi alvo de uma caracterização, resultante da aplicação de um diferente método de extração, após decorrido o período de lixiviação (50 dias). Mais uma vez contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo no seu estado inicial e final (ver figura 21). A apresentação gráfica é realizada nas figuras 80 a 89 apresentando-se na primeira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2.

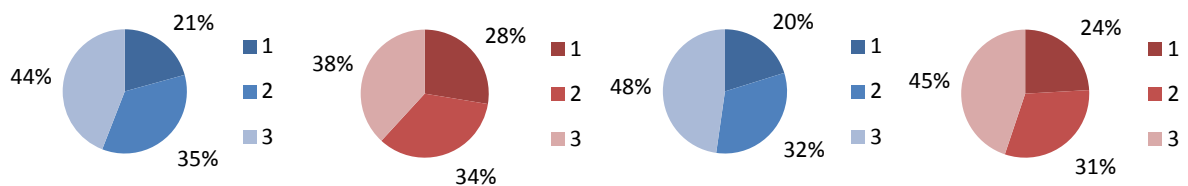


Figura 80 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

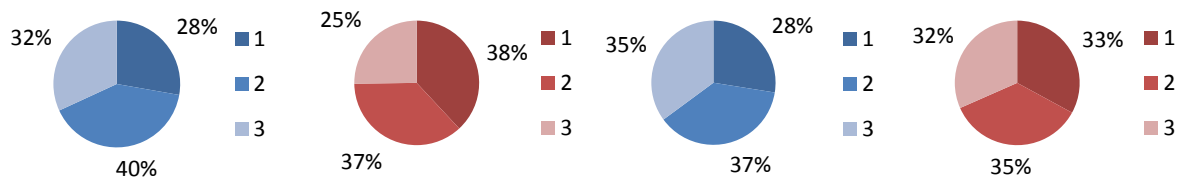


Figura 81 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

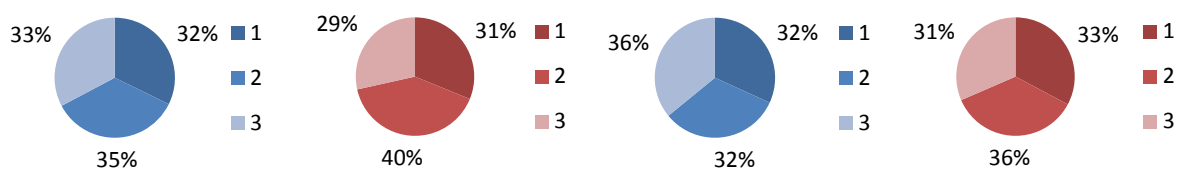


Figura 82 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

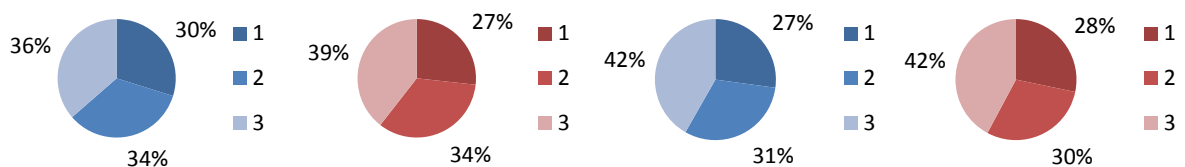


Figura 83 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

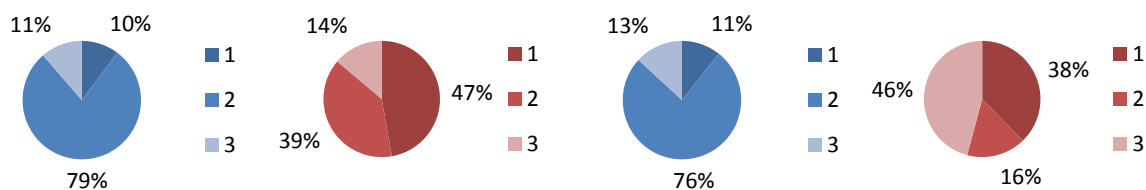


Figura 84 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

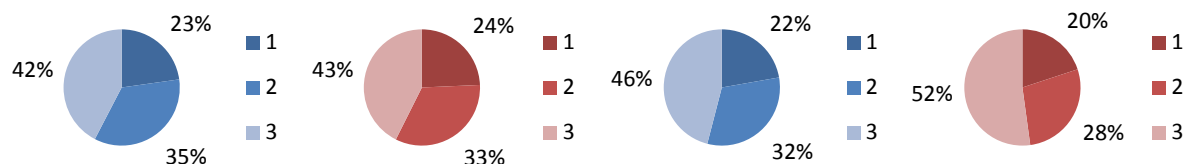


Figura 85 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

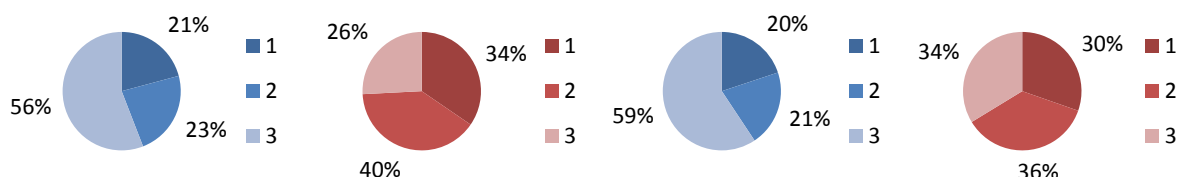


Figura 86 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

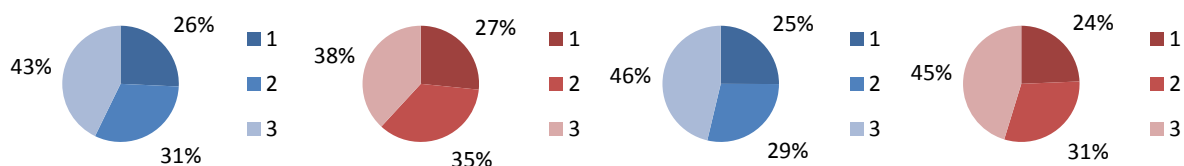


Figura 87 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

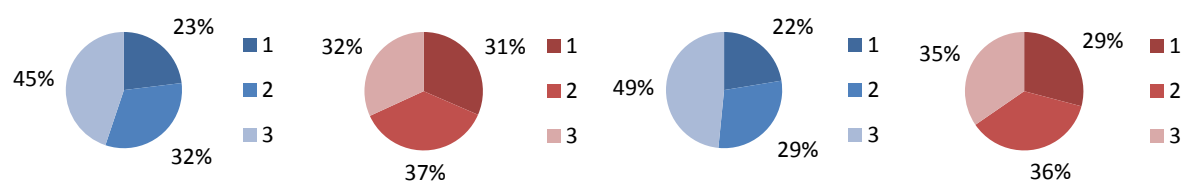


Figura 88 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

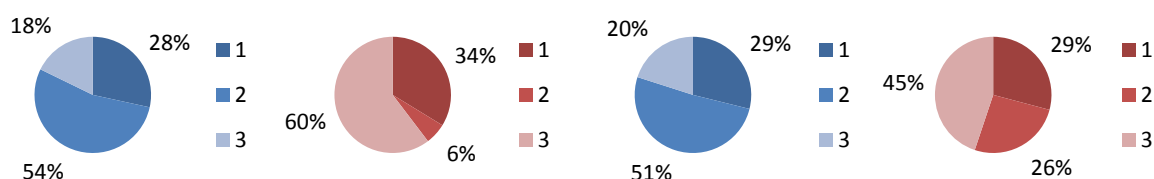


Figura 89 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

O níquel e o crômio apenas são detetados para o solo inicial não se observando nenhuma massa destes elementos no solo final através da extração de Mehlich. Para os elementos fósforo, cálcio, magnésio, sódio, ferro, cobre e zinco verifica-se uma distribuição uniforme dos mesmos pelas três camadas do perfil de solo, observando-se em alguns uma maior incidência, ligeira, na camada do fundo. Verifica-se para o potássio uma distribuição um pouco irregular sendo que, para o solo inicial a distribuição incide na camada do meio para ambas as réplicas, e para o solo final, na réplica #1, distribui-se na maior parte na camada do topo e do meio, e para a réplica #2, distribui-se essencialmente na camada do topo e do fundo. No que respeita ao manganês, no solo inicial a distribuição do mesmo incide na camada do fundo, e no solo final a distribuição apresenta-se relativamente uniforme. Por último apresenta-se o cádmio tendo uma distribuição no solo inicial maioritariamente na camada do meio, e no solo final varia entre ambas as réplicas, sendo que na réplica #1 a distribuição incide na camada do topo e do fundo, e na réplica #2 mostra-se uniforme.

4.2.2.8. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de CaCO_3 , extração de Mehlich

O solo das colunas foi alvo de uma caracterização, resultante da aplicação de um diferente método de extração, após decorrido o período de lixiviação (50 dias). Mais uma vez contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo no seu estado inicial e final (ver figura 21). A apresentação gráfica é realizada nas figuras 90 a 99 apresentando-se na primeira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2.

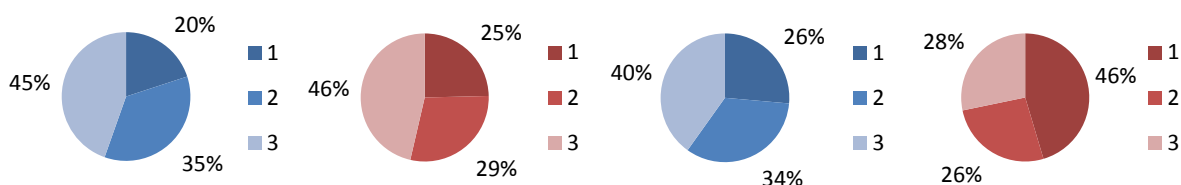


Figura 90 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

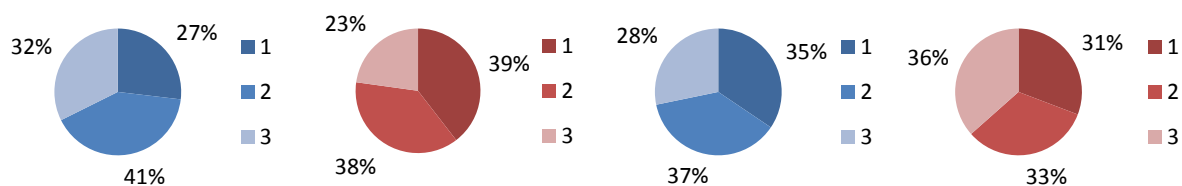


Figura 91 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

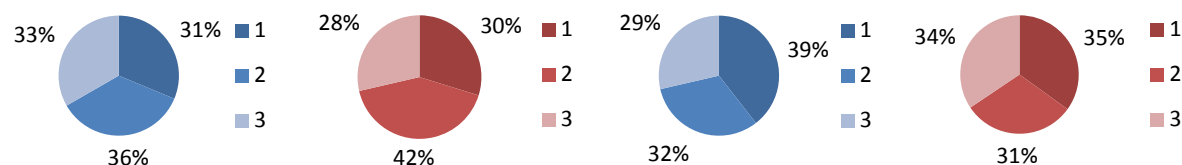


Figura 92 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

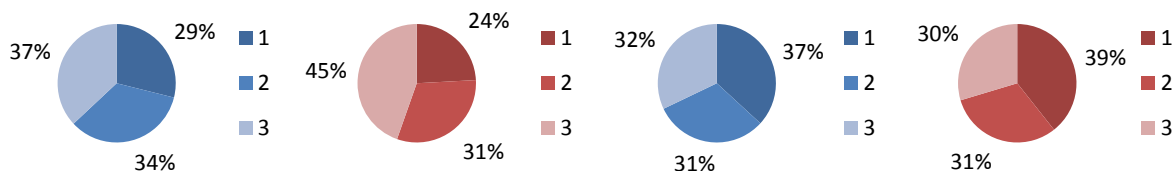


Figura 93 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

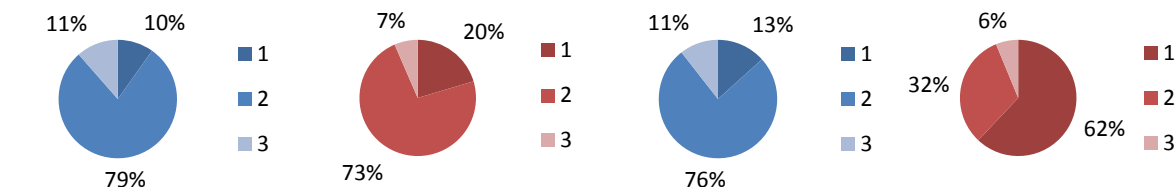


Figura 94 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

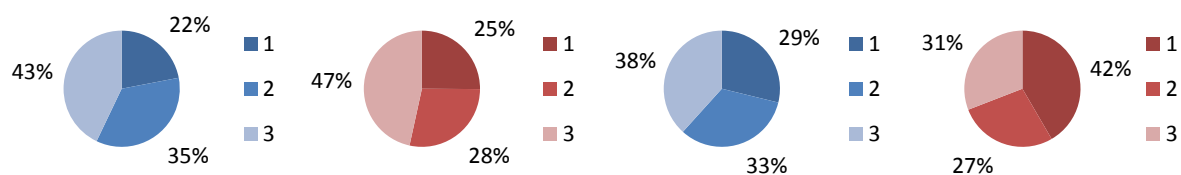


Figura 95 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO_3 , extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

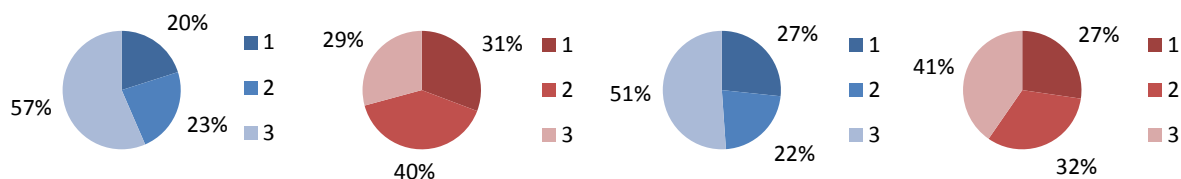


Figura 96 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

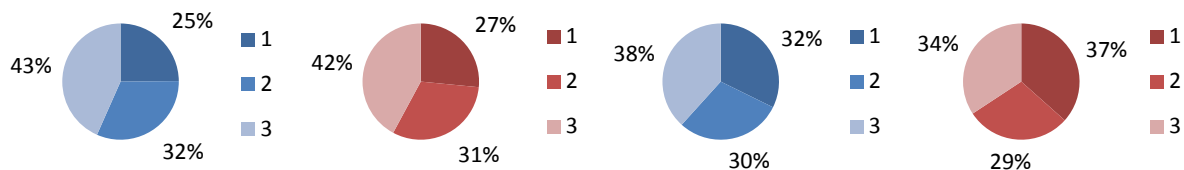


Figura 97 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

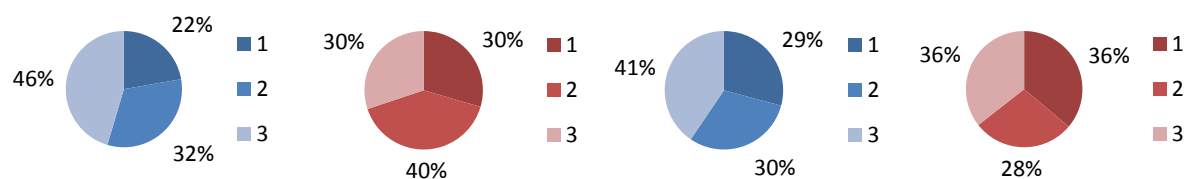


Figura 98 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

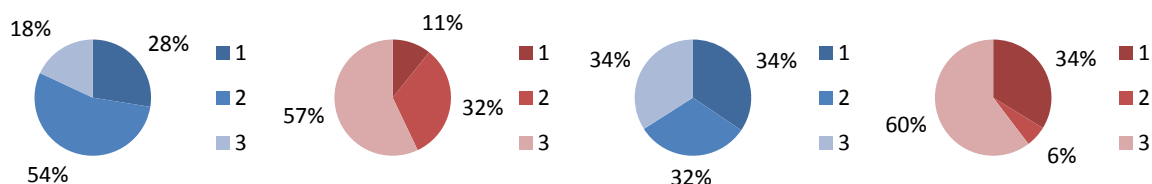


Figura 99 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas CaCO₃, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

O níquel e o crômio apenas são detetados para o solo inicial não se observando nenhuma massa destes elementos no solo final através da extração de Mehlich. A distribuição dos elementos encontra-se próxima à das colunas anteriores, verificando-se que o fósforo, o cálcio, o magnésio, o sódio, o ferro, o cobre e o zinco apresentam uma distribuição uniforme, sendo que alguns destes elementos no solo final incidem um pouco mais na camada do fundo. No caso do potássio este apresenta, para o solo inicial e para a réplica #1 do solo final, uma distribuição maioritária na camada do meio, sendo que para a réplica #2 do solo final a distribuição incide nas camadas do topo e do meio. A distribuição do manganês apresenta-se uniforme para o solo final sendo que para o solo inicial se observa uma maior incidência na camada do fundo. Finalmente, para o caso do cádmio, a distribuição do solo inicial para a réplica #1 mostra-se maior para a camada do topo, e para a réplica #2 mostra-se uniforme, para o solo final, na réplica #1 a distribuição é incide essencialmente nas duas camadas inferiores, e na réplica #1 nas camadas do topo e do fundo.

4.2.2.9. Distribuição dos elementos químicos no perfil do solo das colunas com aplicação de cinza + lama, extração de Mehlich

O solo das colunas foi alvo de uma caracterização, resultante da aplicação de um diferente método de extração, após decorrido o período de lixiviação (50 dias). Mais uma vez contabilizou-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo no seu estado inicial e final (ver figura 21). A apresentação gráfica é realizada nas figuras 100 a 109 apresentando-se na primeira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #1, na segunda coluna a distribuição no solo final para a réplica #1, na terceira coluna a distribuição no solo inicial para a réplica #2 e na quarta coluna a distribuição no solo final para a réplica #2.

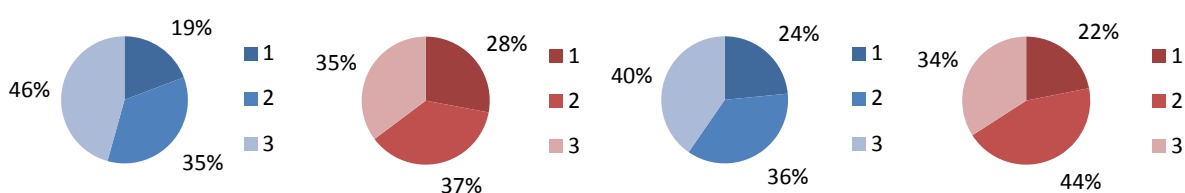


Figura 100 - Valores da distribuição de fósforo no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

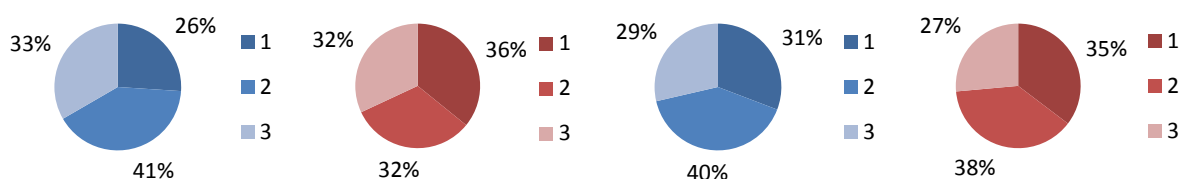


Figura 101 - Valores da distribuição de cálcio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

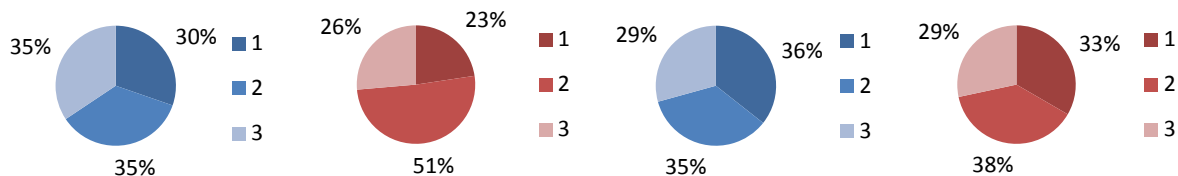


Figura 102 - Valores da distribuição de magnésio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

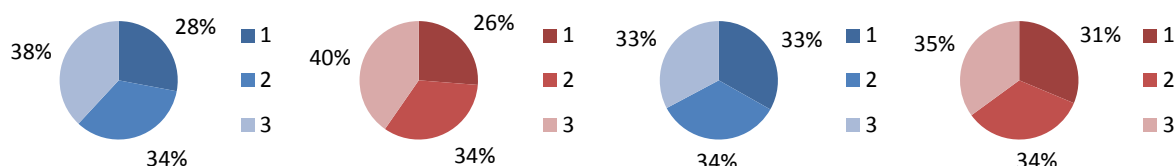


Figura 103 - Valores da distribuição de sódio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

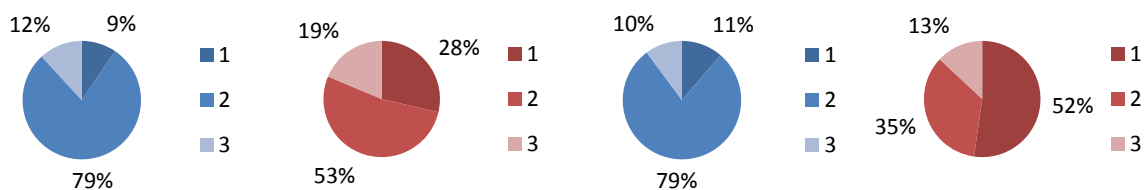


Figura 104 - Valores da distribuição de potássio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

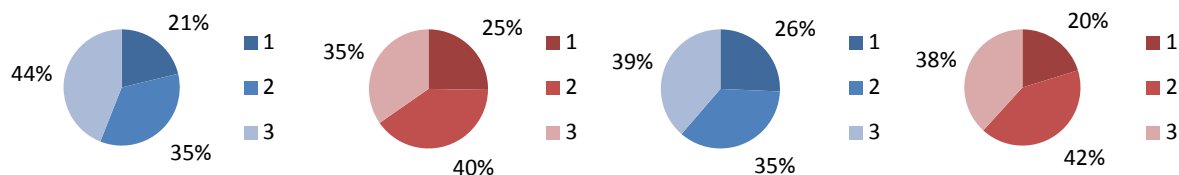


Figura 105 - Valores da distribuição de ferro no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

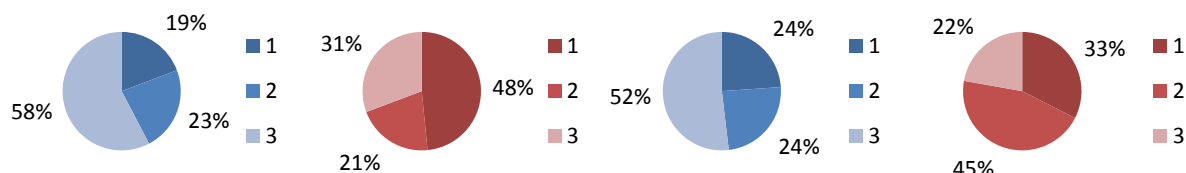


Figura 106 - Valores da distribuição de manganês no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

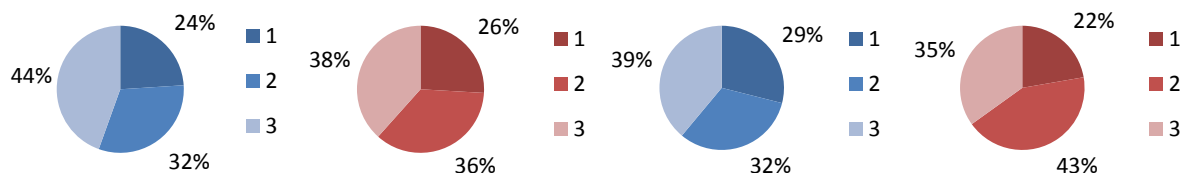


Figura 107 - Valores da distribuição de cobre no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

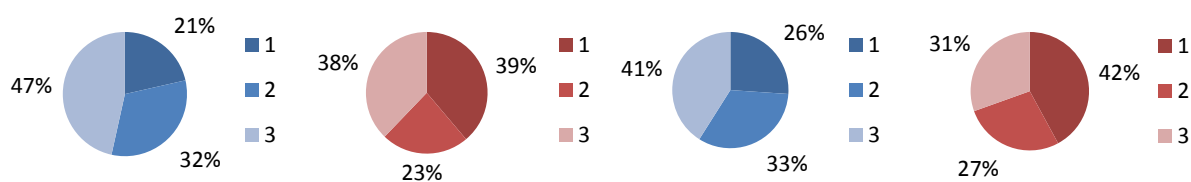


Figura 108 - Valores da distribuição de zinco no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

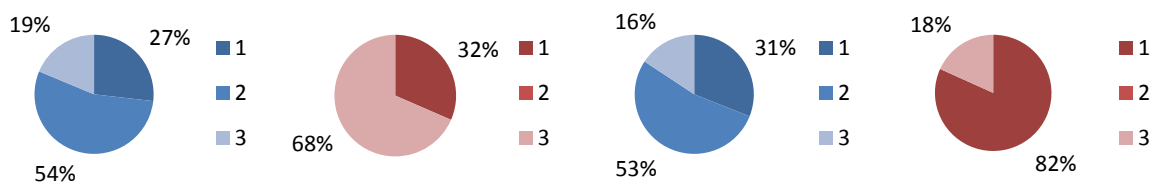


Figura 109 - Valores da distribuição de cádmio no solo inicial (azul) e final (vermelho), para ambas as réplicas das colunas cinza + lama, extração Mehlich (1-Topo, 2-Meio, 3-Fundo)

O níquel e o crómio apenas são detetados para o solo inicial não se observando nenhuma massa destes elementos no solo final através da extração de Mehlich. Os elementos fósforo, cálcio, sódio, ferro, cobre e zinco apresentam distribuições consideravelmente uniformes. O magnésio apresenta uma distribuição uniforme, à exceção da réplica #1 do solo final que incide um pouco mais na camada do meio. A distribuição do potássio é feita, no solo inicial, principalmente na camada do meio, e para o solo final varia em ambas as réplicas, sendo que na réplica #1 incide na camada do topo e na réplica #2 incide nas duas camadas superiores. Relativamente ao manganês observa-se que a distribuição no solo inicial é maioritária na camada do fundo para ambas as réplicas e que no solo final se mostra consideravelmente uniforme. Por fim para o cádmio a distribuição no solo inicial mostra-se maioritária na camada do meio, e no solo final incide principalmente nas camadas do topo e do fundo.

4.2.2.10. Extração aquosa e extração de Mehlich – distribuição dos elementos pelas camadas

Ao observar os resultados obtidos para a distribuição dos diversos elementos analisados neste trabalho, verifica-se ser clara a diferença na distribuição de alguns deles relativamente às duas extrações realizadas. Os elementos que mostram uma distribuição uniforme nas três camadas do perfil de solo, tanto na extração aquosa como na extração de Mehlich são o fósforo, o cálcio e o magnésio. Os restantes elementos mostram diferenças na sua distribuição entre as duas extrações, como se pode observar no caso do sódio. Este apresenta uma distribuição uniforme no caso da extração de Mehlich, sendo que para a extração aquosa mostra uma maior incidência nas duas camadas inferiores na generalidade das colunas. Relativamente ao potássio, este mostra-se uniforme para a extração aquosa, no entanto, no caso da extração de Mehlich, a sua distribuição no solo inicial incide na camada do meio, contudo, no solo final mostra-se muito variável entre as 8 colunas utilizadas no teste de lixiviação. Para o caso do ferro a distribuição ao longo do perfil de solo mostra-se uniforme no caso da extração de Mehlich e no caso do solo inicial na extração aquosa, sendo que no solo final desta extração a distribuição é muito variável entre as diversas colunas.

Os metais pesados mostram uma distribuição diferentes para as duas extrações, como se pode observar no caso do manganês que, na extração aquosa, incide nas camadas do meio e do fundo e na extração de Mehlich, para o solo inicial incide na camada do fundo, e no solo final mostra-se maioritariamente uniforme para todas as colunas. No caso do cobre verifica-se uma distribuição uniforme aquando da extração de Mehlich, o mesmo se observa para a extração aquosa mas apenas para o solo final, sendo que no solo inicial o cobre se encontra essencialmente na camada

do topo. Relativamente ao zinco a distribuição para a extração de Mehlich mostra-se uniforme e para a extração aquosa mostra-se uniforme no solo inicial e bastante variável no solo final, não se verificando a presença de zinco na réplica #1 das colunas cinza + lama. Por último, para o metal pesado cádmio, para a extração aquosa, no solo inicial, mostra uma grande incidência nas camadas do meio e do fundo, sendo que para o solo final a distribuição é muito variável entre as colunas de lixiviação. No caso da extração de Mehlich o cádmio, para o solo inicial, encontra-se em maior percentagem na camada do meio e para o solo final, a maior percentagem de cádmio é observada na camada do fundo.

Os nitratos foram apenas determinados para a extração aquosa uma vez que, a composição da solução da extração de Mehlich não nos permite obter a quantidade de nitratos presentes no solo. A distribuição dos mesmos aquando da extração aquosa mostra-se geralmente uniforme, com uma incidência um pouco superior na camada do meio, sendo que para o solo final a distribuição é maioritária nas camadas do topo e do meio.

4.2.2.11. Balanço mássico às colunas de lixiviação pela extração aquosa

Como já foi referido nas subsecções anteriores, no final do teste de lixiviação as oito colunas foram desmontadas e retirou-se o perfil de solo das mesmas, fazendo-se um balanço de massa entre as colunas no seu estado inicial e final. Na figura 110 é apresentado um esquema para uma coluna inicial, à esquerda, e para uma coluna final, à direita.

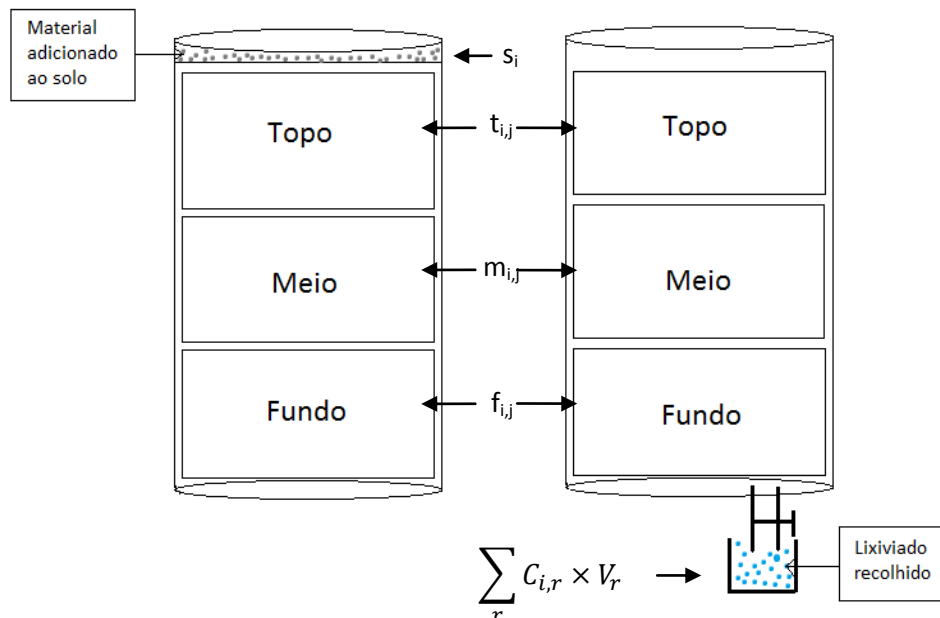


Figura 110 - Esquema das colunas inicial e final do teste de lixiviação com o material adicionado

Para efeito de balanço de massa, no estado inicial foi contabilizada a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo e ainda a massa de cada elemento presente no material adicionado às mesmas. Desta forma, para as colunas solo de referência apenas se contabilizou a massa presente no solo, uma vez que nenhum material lhes foi adicionado. Para as colunas cinza adicionou-se a massa de cada elemento presente na cinza de biomassa, para as colunas CaCO_3 contabilizou-se a massa de cálcio presente no CaCO_3 adicionado, e para as colunas de cinza + lama adicionou-se a massa de cada elemento presente na cinza de biomassa e na lama utilizada.

No estado final, caracterizou-se de igual forma para as 8 colunas de lixiviação, contabilizando-se a massa de cada elemento presente nas três camadas do perfil de solo e a massa de cada elemento lixiviada, através da quantificação e análise dos lixiviados obtidos ao longo da experiência.

Sabendo que,

- $s_i = x_{si} \times m_e$
- $t_{i,j} = x_{ti,j} \times m_{t,j}$
- $m_{i,j} = x_{mi,j} \times m_{m,j}$
- $f_{i,j} = x_{fi,j} \times m_{f,j}$

Com,

s_i – massa de elemento químico i presente no material adicionado na camada superior, kg

x_{si} – fração de elemento químico i presente no material adicionado na camada superior, kg i/kg

m_e – massa de material adicionado, em base seca, kg

$t_{i,j}$ – massa de elemento químico i presente no solo da camada do topo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, kg

$x_{ti,j}$ – fração de elemento químico i presente no solo da camada do topo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, kg i/kg

$m_{t,j}$ – massa da camada do topo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, em base seca, kg

$m_{i,j}$ – massa de elemento químico i presente no solo da camada do meio, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, kg

$x_{mi,j}$ – fração de elemento químico i presente no solo da camada do meio, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, kg i/kg

$m_{m,j}$ – massa da camada do meio, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, em base seca, kg

$f_{i,j}$ – massa de elemento químico i presente no solo da camada do fundo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, kg

$x_{fi,j}$ – fração de elemento químico i presente no solo da camada do fundo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, kg i/kg

$m_{f,j}$ – massa da camada do fundo, no estado inicial para $j=0$ e no estado final para $j=n$, em base seca, kg

O balanço mássico pode ser dado pela equação 12, recorrendo aos valores presentes nas tabelas da secção 4.1 e nas tabelas dos anexos B e C.

$$s_{i,0} + t_{i,0} + m_{i,0} + f_{i,0} = t_{i,n} + m_{i,n} + f_{i,n} + \sum_r C_{i,r} \times V_r \quad \text{Equação 12}$$

Na figura 111 são apresentados os resultados obtidos para o balanço de massa realizado às colunas solo de referência.

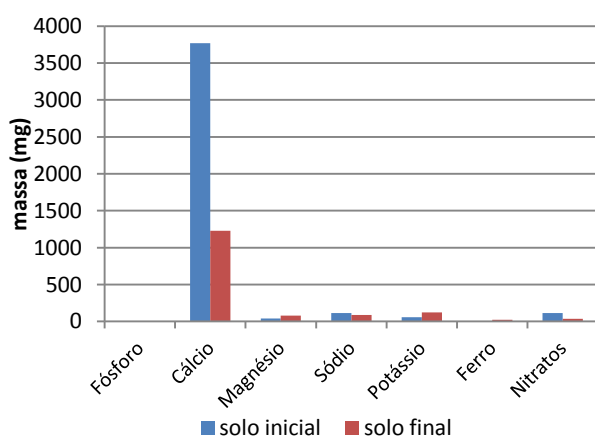


Ilustração 217) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

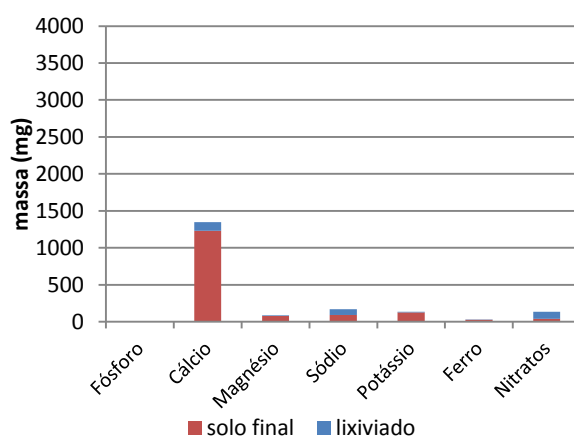


Ilustração 218) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

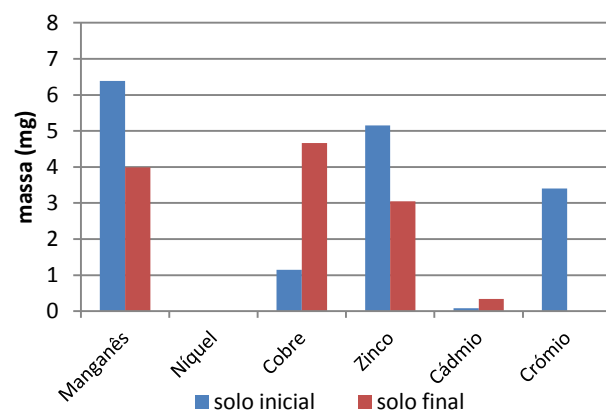


Ilustração 219) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

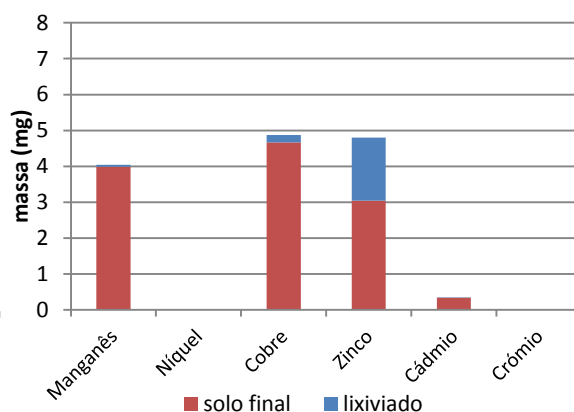


Ilustração 220) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

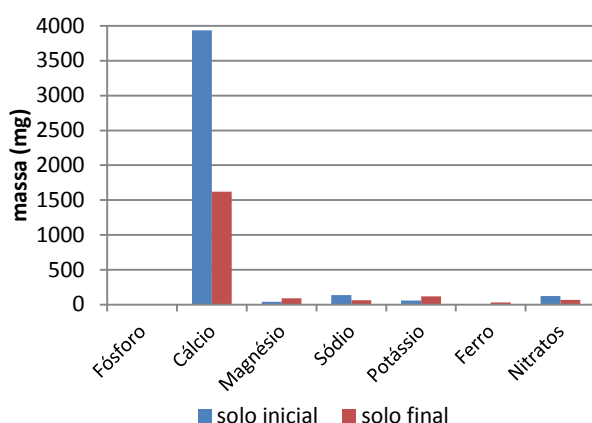


Ilustração 221) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

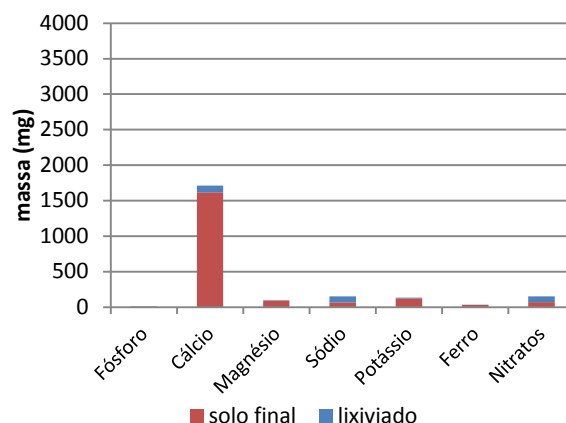


Ilustração 222) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

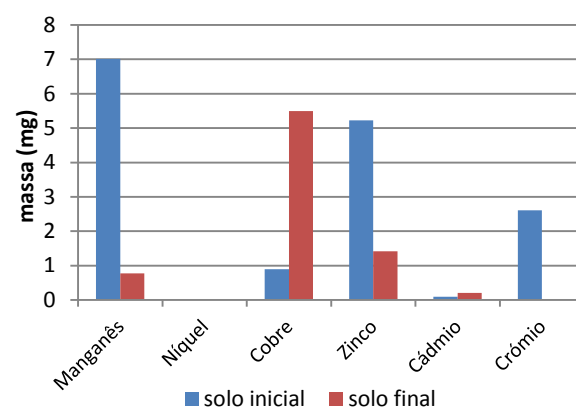


Ilustração 223) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

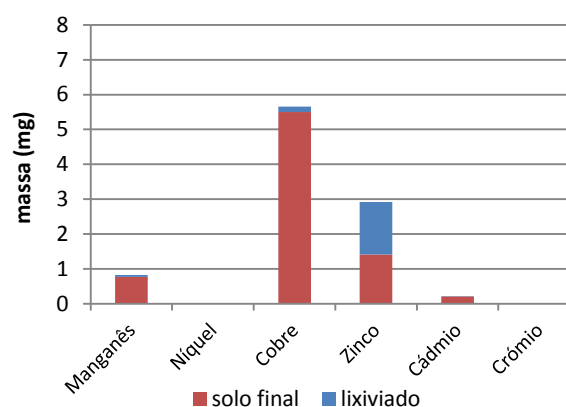


Ilustração 224) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

Figura 111 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas solo referência, extração aquosa

Após analisar os gráficos, verifica-se que a massa de cálcio é bastante elevada no solo inicial, diminuindo para menos de metade no solo final, e como podemos observar no gráfico da direita, o cálcio também não se encontra presente no lixiviado em grande quantidade. O facto de a massa ser bastante inferior no solo final pode indicar que a sua disponibilidade no solo também diminuiu, não sendo extraído em tanta quantidade como no solo inicial. Isto verifica-se para ambas as réplicas da coluna solo referência. Relativamente ao fósforo e ao ferro, a massa destes elementos que é extraída do solo pela extração aquosa é bastante baixa não sendo perceptível nos gráficos anteriores. Para os elementos magnésio, potássio, sódio e nitratos, são perceptíveis no gráfico massas extraídas bastante pequenas mas perfeitamente quantificáveis. A diferença que existe entre a massa, no solo inicial e final, no caso do sódio e dos nitratos pode dever-se ao facto de uma parte dessa massa ter sido lixiviada, como é possível observar. No caso do magnésio e do

potássio observa-se que no solo final a massa extraída é maior o que pode dever-se a um aumento da disponibilidade destes elementos no solo com o passar do tempo.

No que diz respeito aos metais pesados, não se observa a presença de crómio nem de níquel através da extração aquosa realizada ao solo final. Para o manganês e o zinco a massa extraída é bastante maior no solo inicial que no solo final, o que pode dever-se, no caso do manganês, a uma diminuição da disponibilidade deste elemento no solo, e no caso do zinco verifica-se que uma grande parte da massa, cerca de metade, é lixiviada, não estando por isso presente no solo final. O cobre apresenta uma concentração no solo final bastante mais elevada que no solo inicial o que indica que, com o passar do tempo a sua concentração tende a aumentar devido ao aumento da disponibilidade do mesmo no solo, ficando mais propício a ser extraído.

Em seguida, na figura 112 apresenta-se os resultados para as colunas às quais foi adicionada cinza de biomassa.

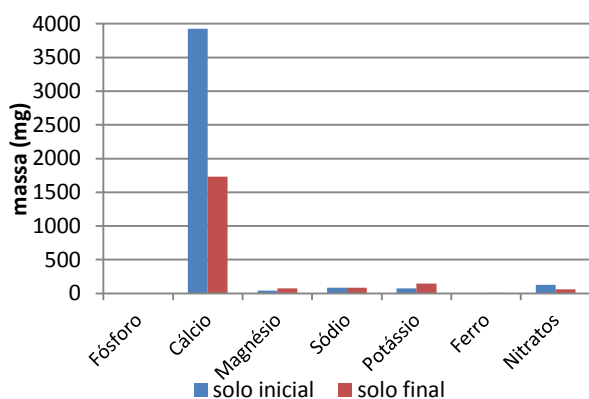


Ilustração 225) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna solo cinza, réplica #1

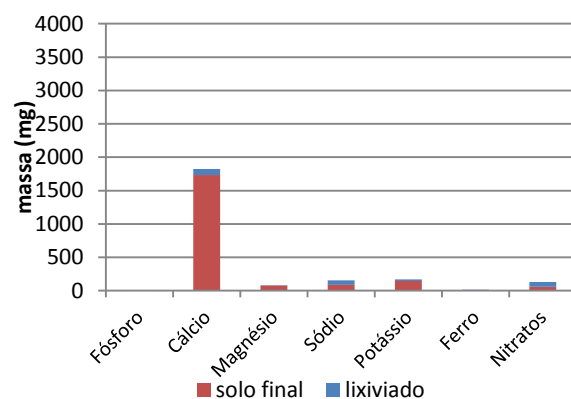


Ilustração 226) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #1

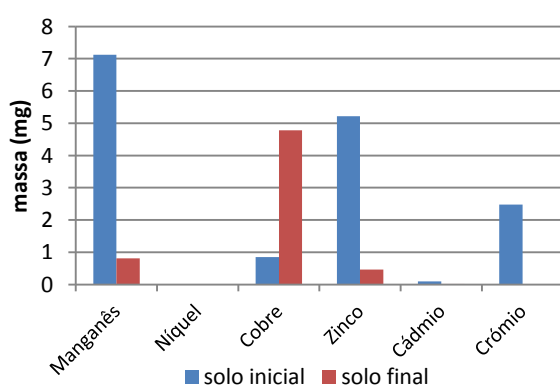


Ilustração 227) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #1

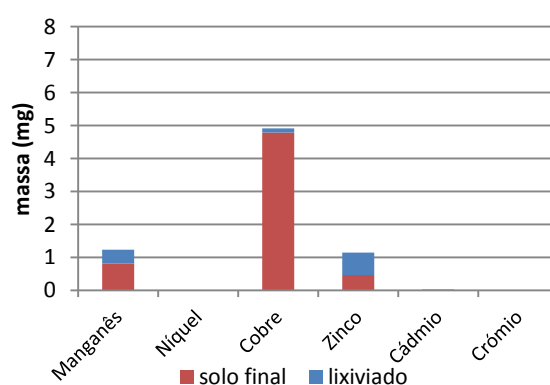


Ilustração 228) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #1

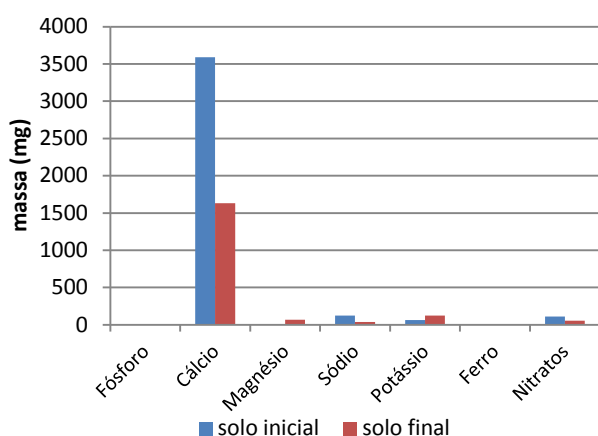


Ilustração 229) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

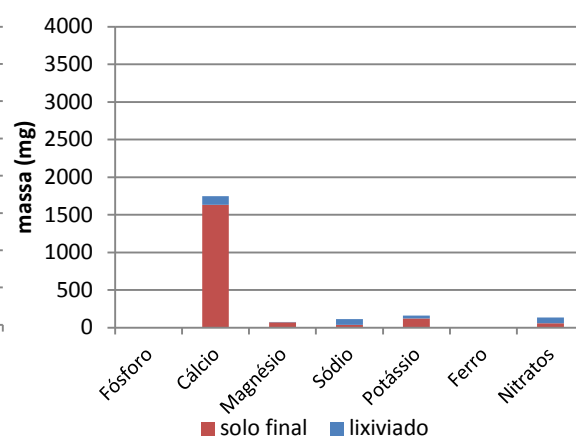


Ilustração 230) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

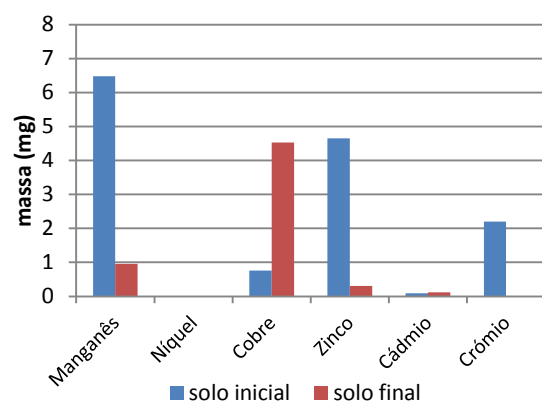


Ilustração 231) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

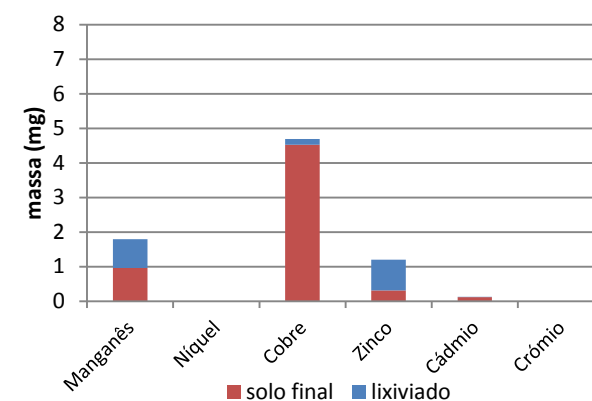


Ilustração 232) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

Figura 112 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza, extração aquosa

Nos gráficos anteriores verifica-se que, para o cálcio, os nitratos, o sódio, o manganês e o zinco, a massa extraída é maior no solo inicial que no solo final o que indicará uma diminuição da disponibilidade dos mesmos no solo com o passar do tempo. Ou poderá dever-se a que uma grande parte da massa foi lixiviada, o que se verifica para o zinco e para os nitratos. No caso do manganês a massa lixiviada não se mostra tão relevante, mas também se verifica que parte dele é lixiviado. Relativamente ao magnésio, ao potássio e ao cobre observa-se que no solo final a massa extraída é maior o que pode dever-se a um aumento da disponibilidade destes elementos no solo com o passar do tempo. Não se verifica a presença de níquel e de crómio no solo final. No caso do ferro e do fósforo a quantidade de massa extraída não é perceptível uma vez que é bastante baixa. Ao compararmos com o solo de referência, não se verifica um claro aumento da massa dos elementos analisados para as colunas às quais foi adicionada cinza de biomassa.

Os resultados obtidos através da extração aquosa para ambas as réplicas das colunas onde foi adicionado CaCO_3 são apresentados na figura 113.

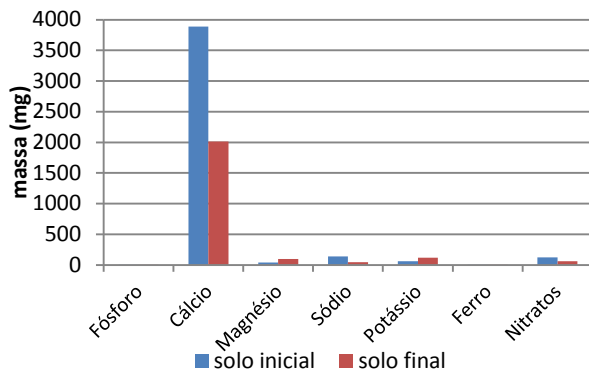


Ilustração 233) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #1

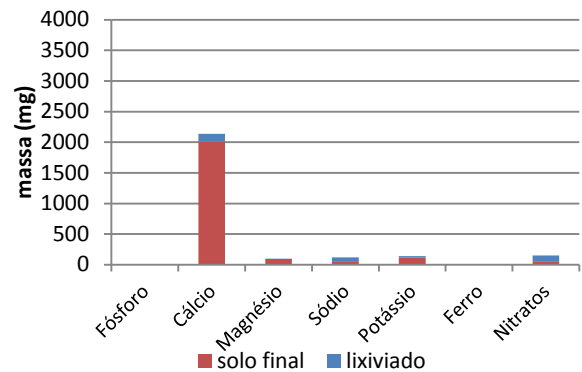


Ilustração 234) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #1

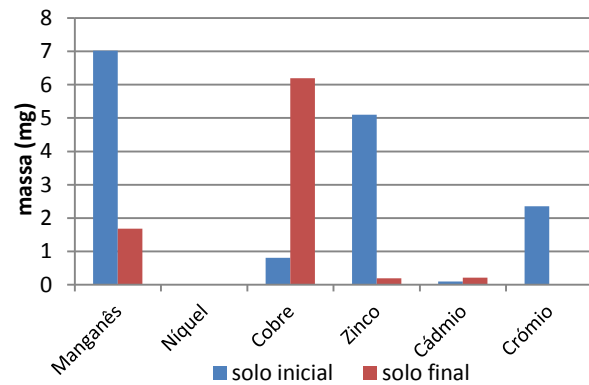


Ilustração 235) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #1

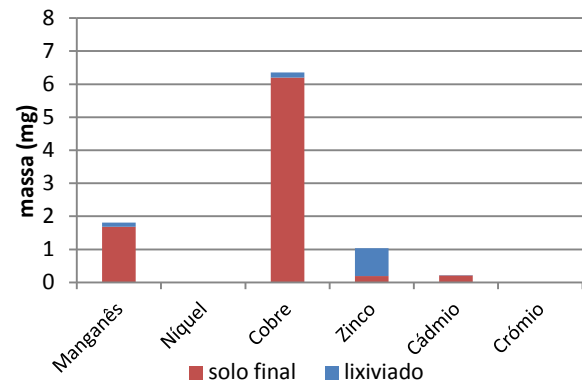


Ilustração 236) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #1

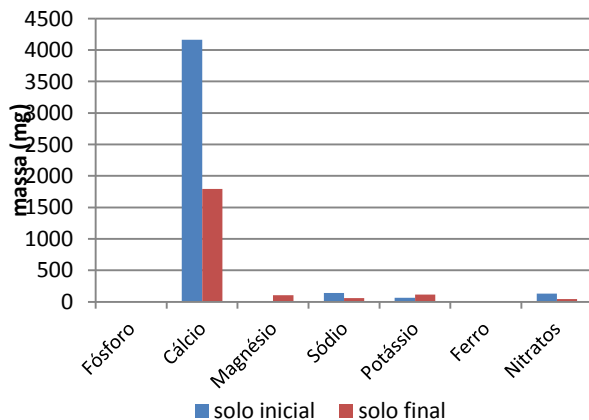


Ilustração 237) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

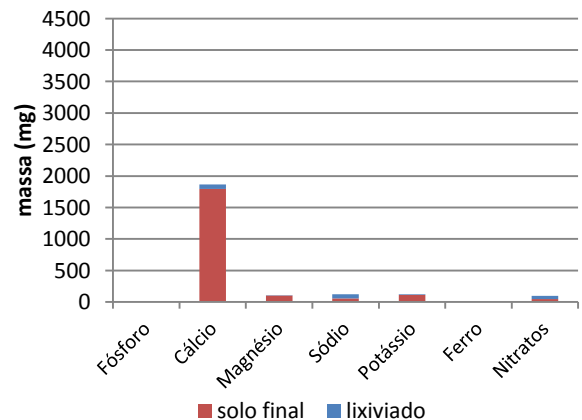


Ilustração 238) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

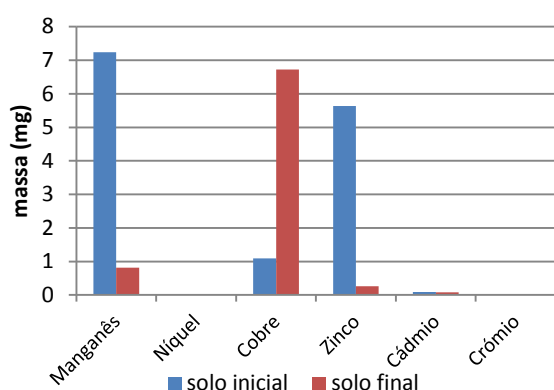


Ilustração 239) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

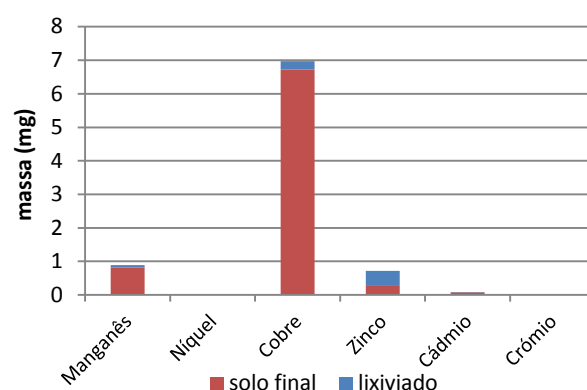


Ilustração 240) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

Figura 113 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas CaCO_3 , extração aquosa

Para as colunas de cinza observa-se que a massa de cálcio no solo final é superior às restantes colunas analisadas, atingindo valores próximos dos 2000 mg, o que se deve à adição de carbonato de cálcio nas mesmas, e ainda que a massa do mesmo no solo inicial é bastante superior à massa no solo final. Também para os nitratos, o manganês, o sódio e o zinco, se observa uma maior massa no solo inicial que no solo final. Para o caso do sódio, dos nitratos e do zinco deve-se, essencialmente, a uma grande parte da massa destes elementos ser lixiviada ao longo do teste de lixiviação realizado. No caso do cálcio e do manganês verifica-se que a disponibilidade dos mesmos tende a diminuir com o passar do tempo uma vez que, a quantidade que é lixiviada destes elementos não justifica esta diferença de massa. Para o fósforo e o ferro a massa extraída do solo tem valores bastante baixos, não sendo perceptível nos gráficos anteriores. Verifica-se uma massa de cobre, potássio e magnésio mais elevada no solo final e uma massa lixiviada bastante baixa, isto pode indicar o aumento da disponibilidade destes elementos no solo com o passar do tempo. No caso do níquel e do crómio não se observa a presença de nenhum destes elementos do solo final.

Na figura 114 são apresentados os resultados obtidos para ambas as réplicas das colunas às quais foi adicionada cinza + lama, obtidos através da extração aquosa.

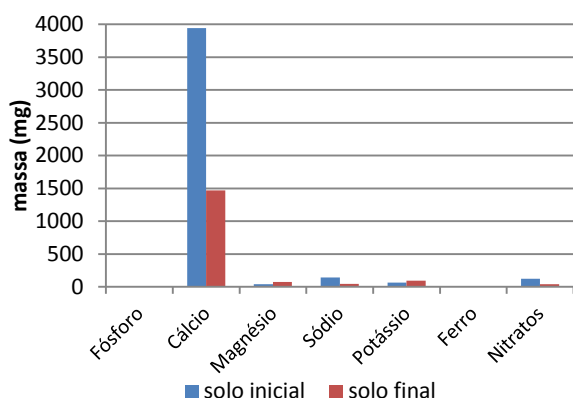


Ilustração 241) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna solo cinza + lama, réplica #1

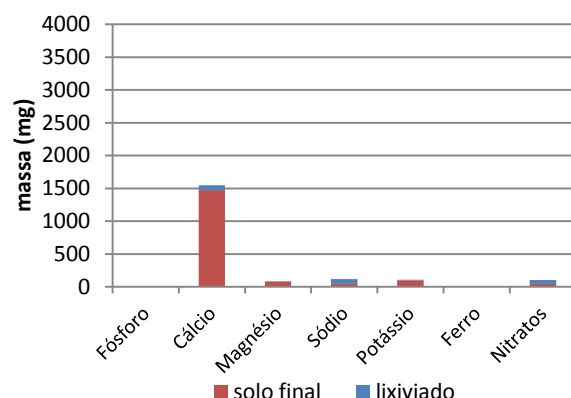


Ilustração 242) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #1

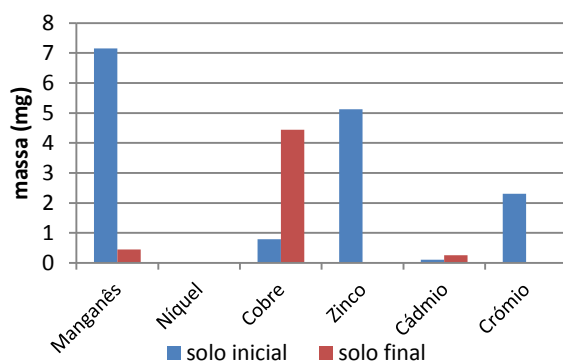


Ilustração 243) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #1

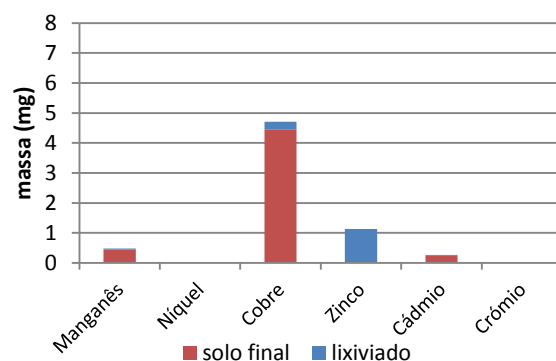


Ilustração 244) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #1

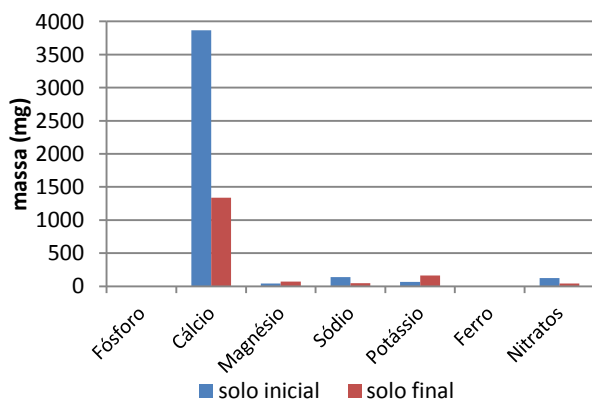


Ilustração 245) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

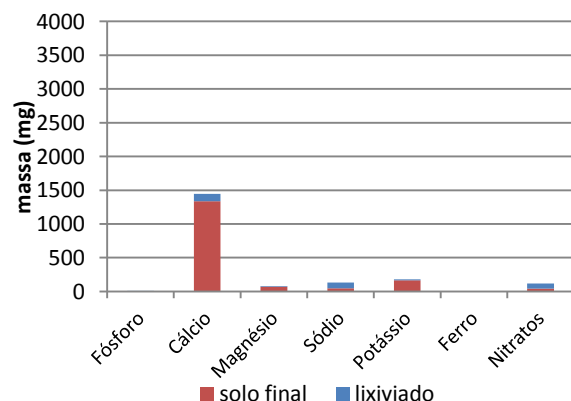


Ilustração 246) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e Nitratos no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

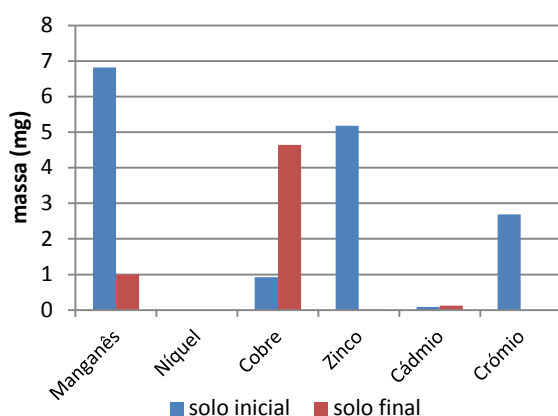


Ilustração 247) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

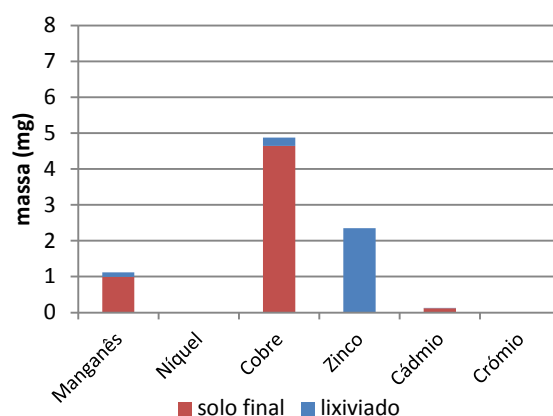


Ilustração 248) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 114 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Nitratos e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza + lama, extração aquosa

Para as colunas cinza + lama verificam-se valores de cálcio no solo final bastante inferiores aos valores no solo inicial, assim como para os nitratos, o manganês e o zinco, o que pode indicar uma diminuição da disponibilidade destes elementos no solo com o passar do tempo. No caso particular do zinco e dos nitratos, a massa presente no solo final é bastante inferior sendo uma grande parte do mesmo lixiviado durante o teste realizado. No caso do metal cobre, verifica-se um aumento da disponibilidade do mesmo com o passar do tempo, uma vez que a massa extraída é bastante maior no solo final que no solo inicial, o que também se verifica, não tão claramente, para o caso do cádmio, do magnésio e do potássio. Relativamente ao fósforo e ao ferro a massa extraída, tanto no solo inicial como no solo final, não é perceptível nos gráficos anteriores por ser muito baixa. Não se verifica a presença de níquel nem de crómio no solo final através da extração aquosa para estas colunas.

4.2.2.12. Balanço mássico às colunas de lixiviação pela extração de Mehlich

Para o balanço mássico às colunas de lixiviação através da extração de Mehlich procedeu-se segundo o esquema da figura 110 e de igual forma à extração aquosa, no entanto a solução de extração utilizada foi a Mehlich III.

Os resultados obtidos para o balanço de massa realizado às colunas de referência são apresentados na figura 115.

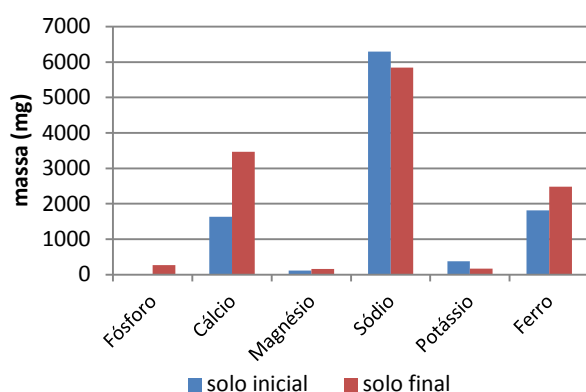


Ilustração 249) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

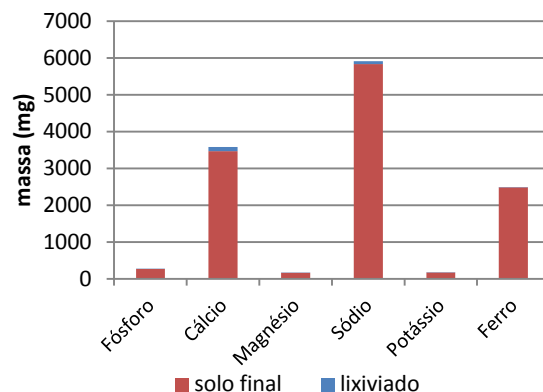


Ilustração 250) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

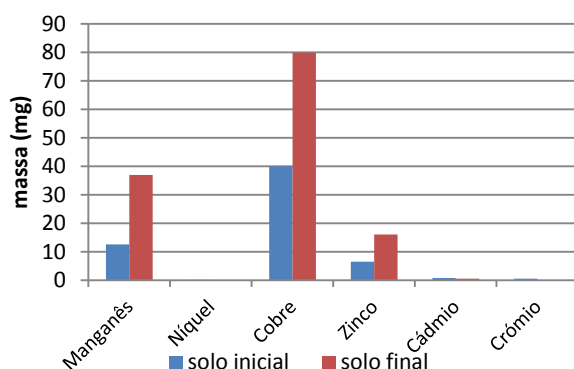


Ilustração 251) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

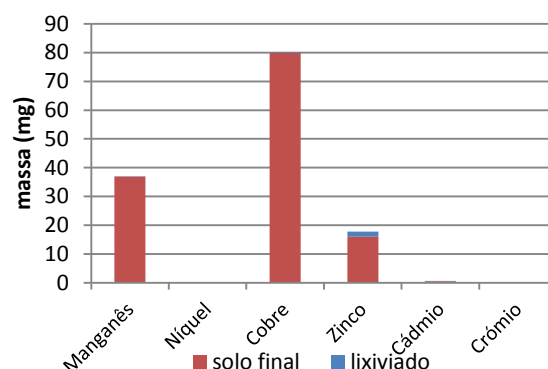


Ilustração 252) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #1

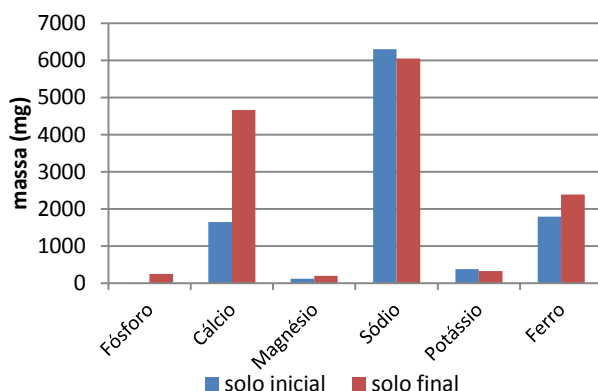


Ilustração 253) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

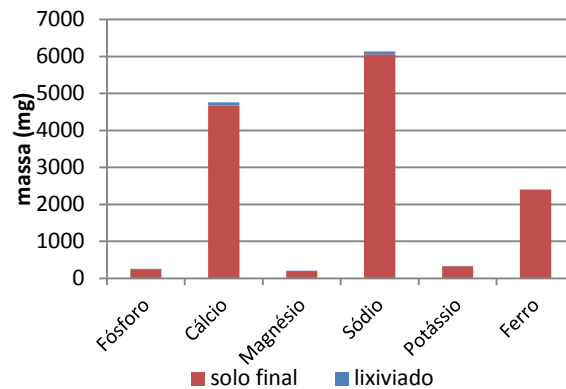


Ilustração 254) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

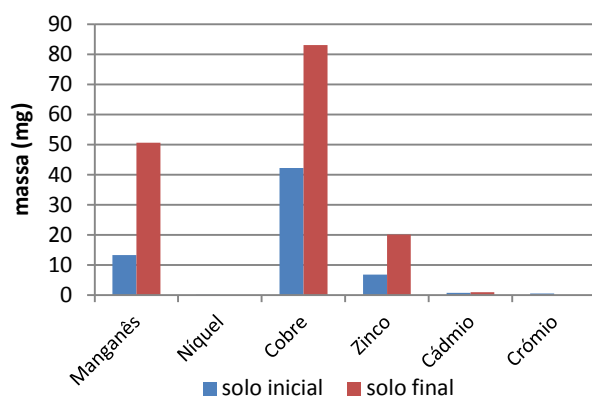


Ilustração 255) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

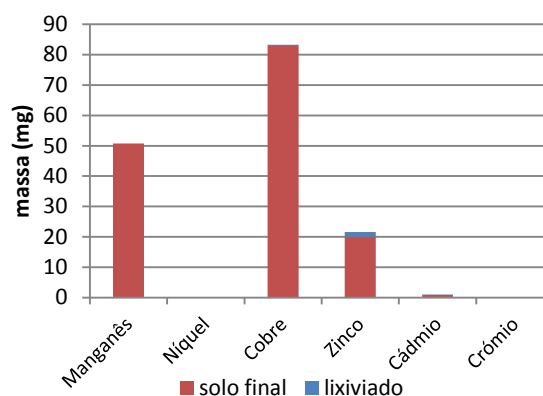


Ilustração 256) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna solo referência, réplica #2

Figura 115 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas solo referência, extração Mehlich

Para a extração de Mehlich observa-se que a quantidade de cada elemento lixiviada aquando do teste de lixiviação representa uma pequena fração relativamente à massa do mesmo presente no solo inicial e final. Os elementos que se encontram em maior quantidade no solo, pelos resultados obtidos através da extração de Mehlich, são o sódio e o cálcio. Na sua generalidade, para todos os elementos que apresentam uma massa no solo superior a 1 mg, verifica-se um aumento na massa de elemento extraída do solo inicial para o solo final o que, no caso do solo de referência ao qual nenhuma substância foi adicionada com a exceção da água durante o teste de lixiviação, pode dever-se ao aumento da disponibilidade dos elementos no solo com o passar do tempo. Relativamente ao sódio os valores obtidos para o solo inicial e para o solo final foram bastante próximos, principalmente para a réplica #1. Os valores de cádmio presente no solo são baixos e não perceptíveis nos gráficos anteriores. Quanto ao níquel e ao crômio, nenhuma massa destes elementos foi extraída do solo final.

Os resultados obtidos para ambas as colunas com cinza, obtidos através da extração de Mehlich, são apresentados na figura 116.

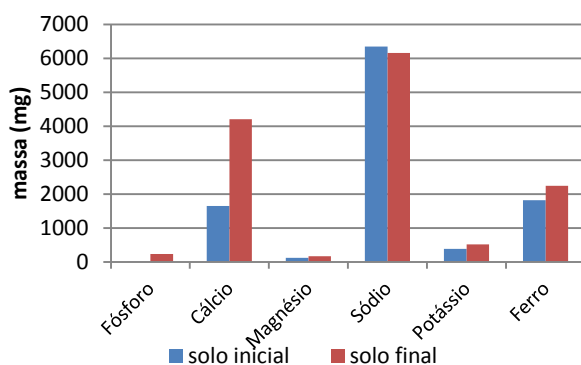


Ilustração 257) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe o solo inicial e final para a coluna solo cinza, réplica #1

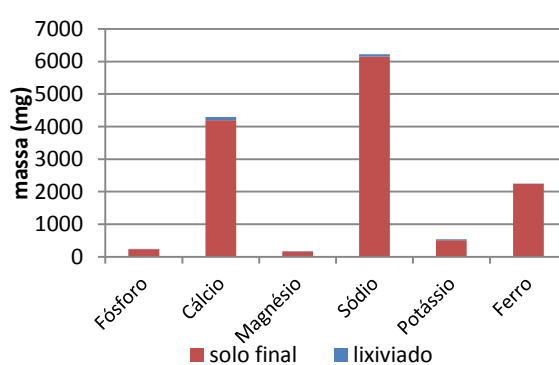


Ilustração 258) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #1

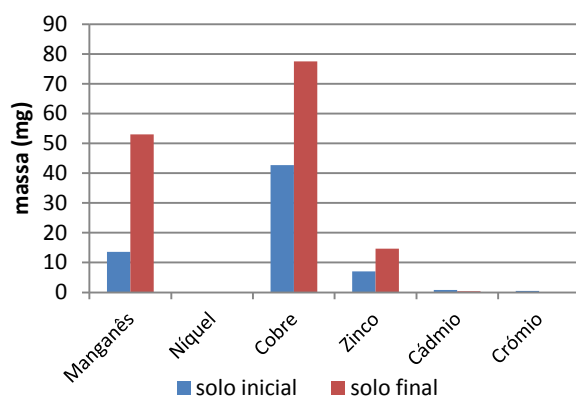


Ilustração 259) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #1

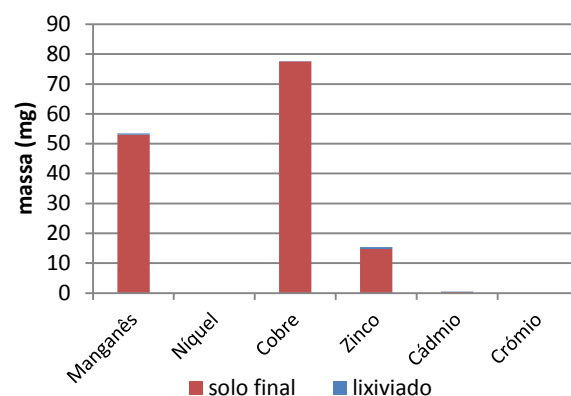


Ilustração 260) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #1

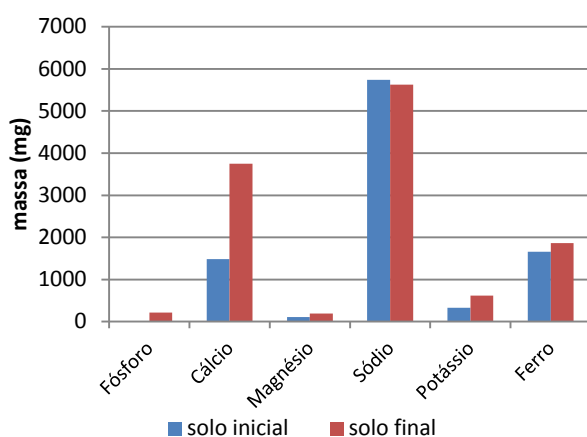


Ilustração 261) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

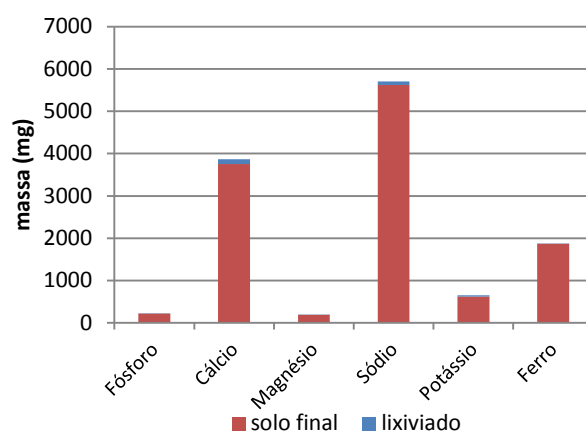


Ilustração 262) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

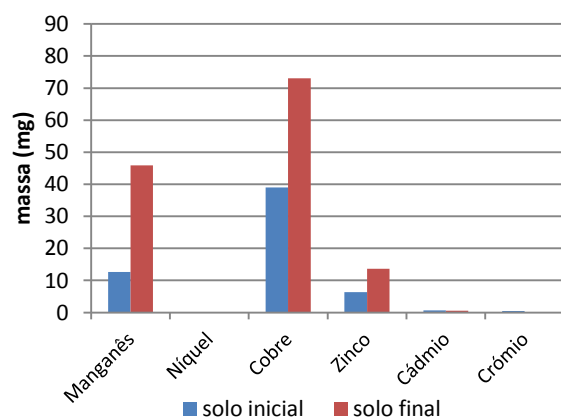


Ilustração 263) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

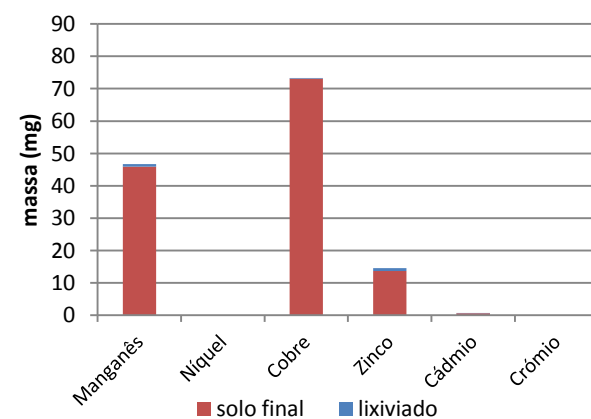


Ilustração 264) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza, réplica #2

Figura 116 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza, extração de Mehlich

Ao analisar os gráficos das colunas cinza verifica-se que, tanto no solo inicial como no solo final, o elemento que se encontra em maior quantidade através da extração de Mehlich é o sódio, apresentando valores muito próximos no solo inicial e no solo final, sendo ainda o único a apresentar-se em maior quantidade no solo inicial. Para os restantes elementos, com a exceção do níquel e do crómio, a massa extraída do solo final é maior que a massa extraída do solo inicial indicando, como já referido anteriormente, o aumento da mobilidade destes elementos no solo com o passar do tempo. Relativamente ao níquel e ao crómio, através da extração de Mehlich não se verifica a sua presença no solo final, não se verificando também a sua presença no lixiviado.

Para as colunas CaCO_3 são apresentados os resultados obtidos, para os diferentes elementos analisados, na figura 117.

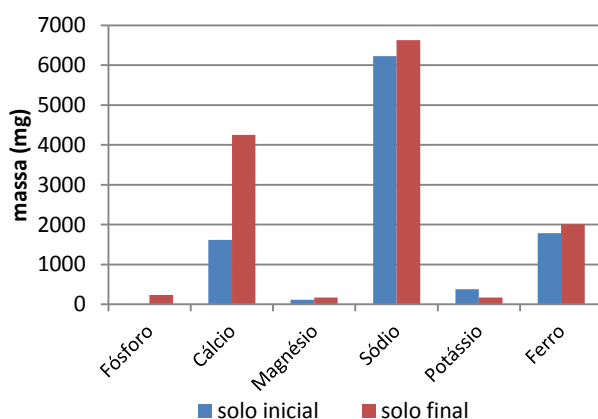


Ilustração 265) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna solo CaCO_3 , réplica #1

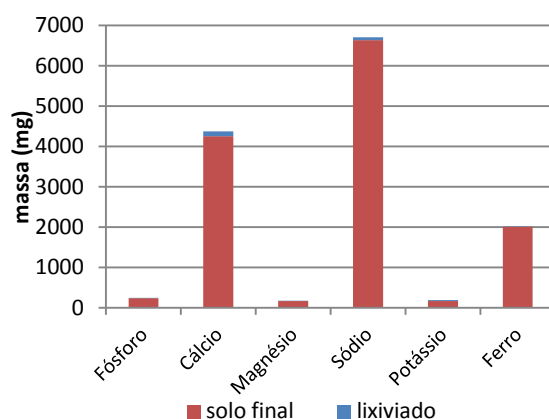


Ilustração 266) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #1

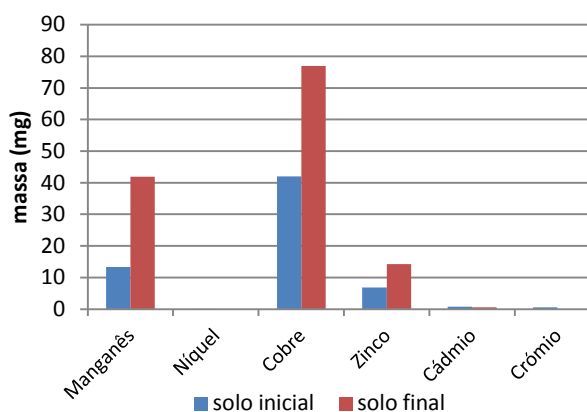


Ilustração 267) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #1

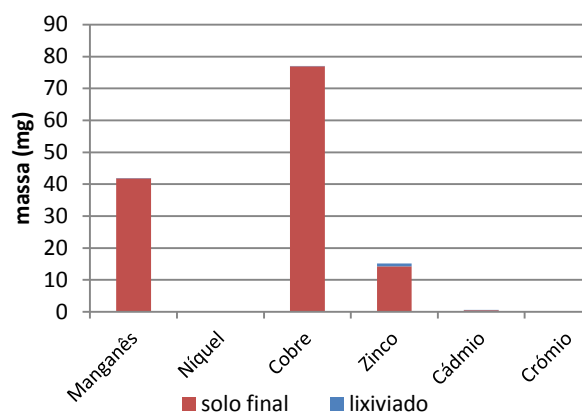


Ilustração 268) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #1

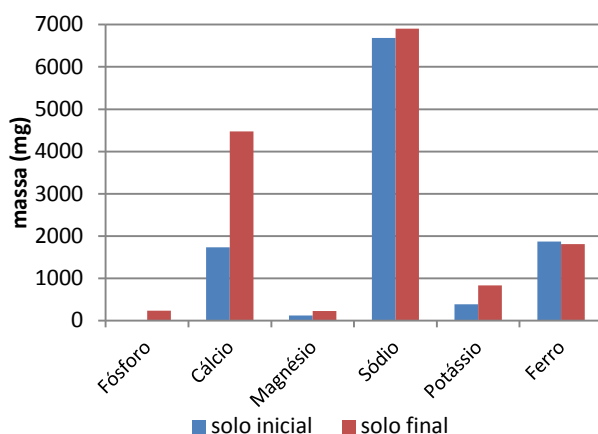


Ilustração 269) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

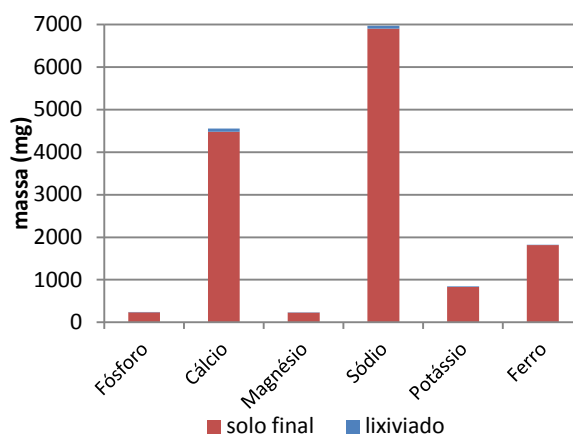


Ilustração 270) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

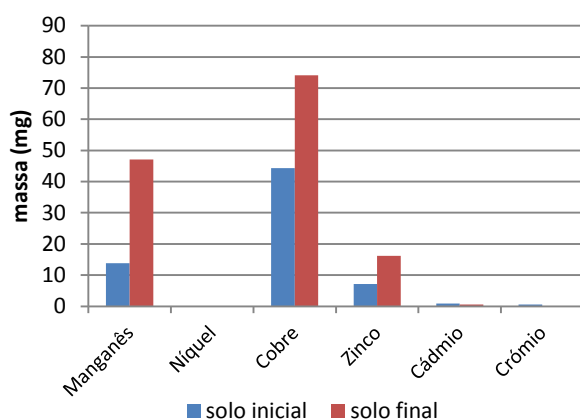


Ilustração 271) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

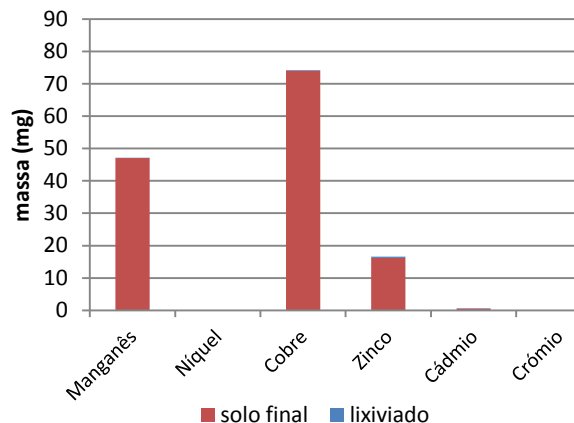


Ilustração 272) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna CaCO_3 , réplica #2

Figura 117 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas CaCO_3 , extração de Mehlich

Ao analisar os gráficos anteriores verifica-se que, todos os elementos com massas superiores a 1mg, se encontram em maior quantidade no solo final que no solo inicial, com exceção do potássio e do cádmio para a réplica #1 e do ferro para a réplica #2. Este aumento da massa presente no solo, do solo inicial para o final, dever-se-á ao aumento da disponibilidade e da mobilidade destes elementos no solo, como já foi referido anteriormente. Os elementos com massas não perceptíveis nos gráficos anteriores, o níquel e o crômio, uma vez que não são extraídos através da extração realizada, conclui-se que não se encontram presentes no solo final analisado. Verifica-se ainda que, como referido para as colunas anteriores, a massa lixiviada de cada elemento representa uma pequena fração relativamente à massa do mesmo presente no solo final.

Em seguida, na figura 118 são apresentados os resultados obtidos para as colunas com cinza + lama através da extração de Mehlich.

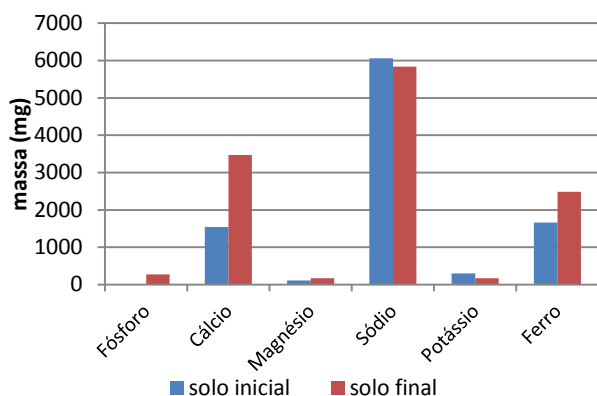


Ilustração 273) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna solo cinza + lama, réplica #1

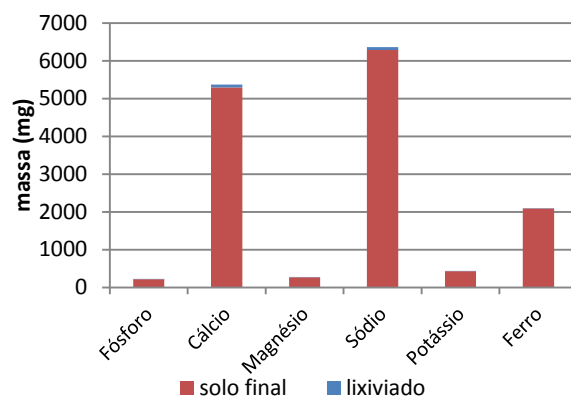


Ilustração 274) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #1

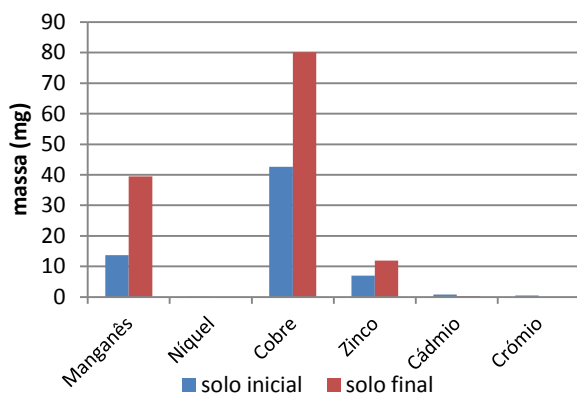


Ilustração 275) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #1

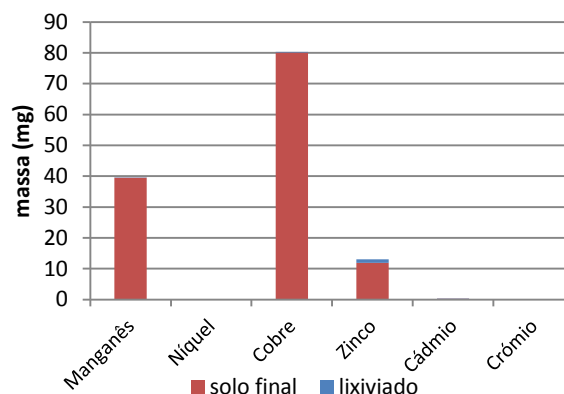


Ilustração 276) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #1

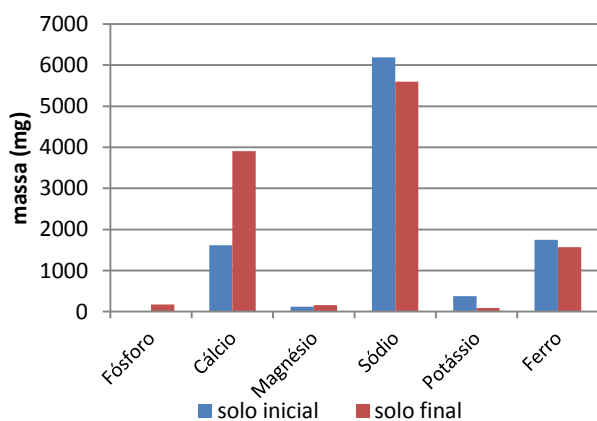


Ilustração 277) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

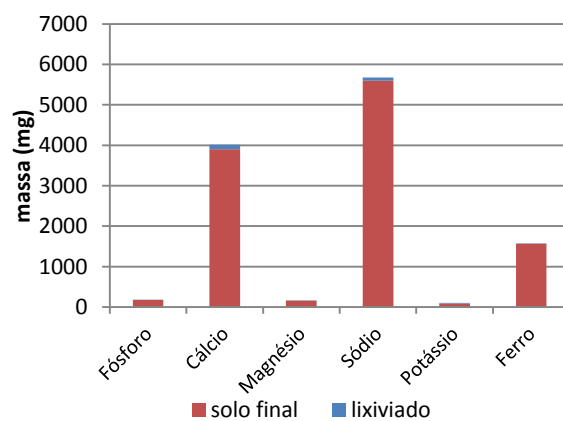


Ilustração 278) - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

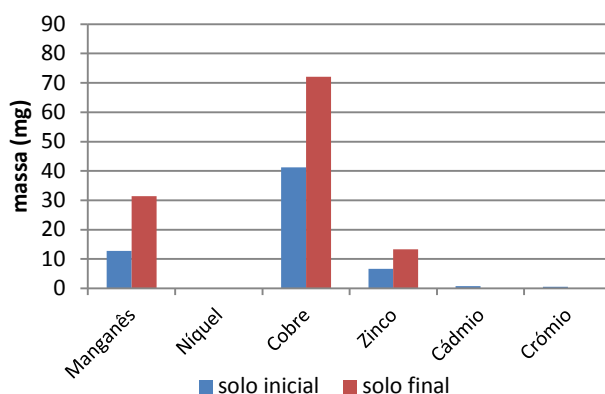


Ilustração 279) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

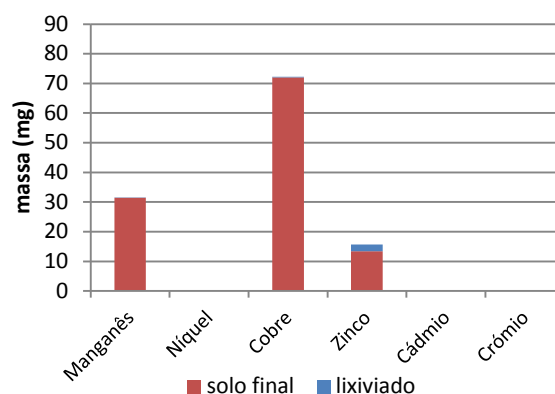


Ilustração 280) - Valores de metais pesados no solo inicial e final para a coluna cinza + lama, réplica #2

Figura 118 - Valores de P, Ca, Mg, Na, K, Fe e metais pesados para o solo inicial e final das colunas cinza + lama, extração Mehlich

Observa-se mais uma vez que a massa lixiviada de cada elemento representa uma pequena fração relativamente à massa extraída do solo. Relativamente ao sódio e ao potássio a massa extraída do solo inicial é maior que a massa extraída do solo final, o mesmo se verifica para o ferro mas apenas para a réplica #2. Para o fósforo, o cálcio, o magnésio, o manganês, o cobre e o zinco a massa extraída do solo final é mais elevada que a massa extraída do solo inicial, o que indica um aumento da disponibilidade destes elementos no solo e da sua mobilidade com o passar do tempo. Não se observa a presença de níquel e de crômio no solo final, sendo que para o cádmio observa-se valores não muito perceptíveis deste elemento no solo inicial e final.

4.2.2.13. Extração aquosa e extração de Mehlich – balanço mássico

Na análise dos resultados obtidos para o balanço de massa, observa-se que as duas extrações realizadas apresentam valores bastante distintos. Todos os elementos analisados, com exceção do cálcio, são extraídos em maior quantidade na extração de Mehlich II. No caso do cálcio, este apresenta-se em maior quantidade na extração aquosa. Nesta, o cálcio está presente principalmente no solo inicial diminuindo bastante no solo final.

O contrário se verifica na extração de Mehlich, onde o cálcio aumenta notoriamente no solo final. Isto indica que o cálcio se torna mais biodisponível no final, uma vez que aumenta no solo final através da extração de Mehlich II. Com o passar do tempo, e durante os dois meses do teste de lixiviação, podem ocorrer reações no solo que tornam o cálcio menos solúvel. Pode ser uma das explicações a dar para que este não apareça em tão grande quantidade no solo final, através da extração aquosa.

Os nitratos foram determinados apenas através da extração aquosa, uma vez que, a solução de Mehlich III não nos permitia a sua quantificação. Concluiu-se que estes se encontram presentes no solo quase na sua totalidade, e que a quantidade de nitratos presente nos materiais adicionados não se mostra relevante.

Para ambas as extrações a massa lixiviada de cada elemento representa uma pequena fração relativamente à massa presente no solo, à exceção dos nitratos na extração aquosa, e do zinco em ambas as extrações. Verifica-se que esta diferença é mais acentuada no caso da extração de Mehlich, visto que os valores da massa extraída do solo, também são mais elevados para esta extração. Em particular, no caso da extração de Mehlich III, elementos como o sódio, o potássio e o ferro, apresentam massas elevadas e bastante próximas, no início e no final do teste de lixiviação, para todas as colunas. Desta forma, podemos concluir que a biodisponibilidade destes elementos se mostra bastante próxima, no estado inicial e no estado final.

Importante será referir a elevada influência da lama na biodisponibilidade dos elementos no solo final. Ao observar os valores obtidos para as colunas cinza + lama, e comparando com os valores determinados para as colunas cinza e colunas CaCO_3 , verifica-se que a aplicação de lama em conjunto com a cinza diminui a biodisponibilidade de diversos elementos, com o passar do tempo. Tal se verifica para ambas as extrações realizadas e para elementos como o cálcio, o manganês, o zinco, entre outros.

4.2.3. Teste de fitotoxicidade, ou crescimento

Para ser possível avaliar a influência das cinzas de biomassa no crescimento das plantas, realizou-se um teste de crescimento usando erva comum. Utilizaram-se 12 vasos, três réplicas para cada aplicação, solo referência, cinza + lama, cinza e CaCO_3 . O teste de crescimento teve a duração de 15 dias, e foi realizado dentro do laboratório. Ao fim dos 15 dias o aspeto dos vasos e da erva era o apresentado na figura 119, onde se pode observar o tamanho das plantas.



Figura 119 - Aspeto da erva semeada, 15 dias após aplicação de cinza, lama e CaCO_3

Após o teste, procedeu-se ao corte da erva e à secagem da mesma. Para isso levou-se a erva à estufa de forma a se obter a massa seca de erva que cresceu em cada um dos vasos utilizados no teste de crescimentos. Após a secagem da erva cada recipiente foi pesado e assim obteve-se a massa de erva seca para cada uma das réplicas realizadas. Os resultados do teste de crescimento são apresentados na tabela 24 onde podemos analisar a massa de erva seca obtida para cada uma das réplicas, e a média das massas obtidas das três réplicas realizadas para cada aplicação.

Tabela 24 - Valores de massa de erva seca obtida no teste de crescimento

	Réplica	m _{erva seca} (g)	Índice	Índice _valor médio	Desvio Padrão (g)	Coefficiente Variação (%)
Solo referência	#1	0,299	-			
	#2	0,273	-	-	-	-
	#3	0,302	-			
Cinza + lama	#1	0,277	0,951			
	#2	0,316	1,085	1,056	0,146	15
	#3	0,330	1,133			
Cinza	#1	0,246	0,844			
	#2	0,293	1,006	0,995	0,155	14
	#3	0,331	1,136			
CaCO₃	#1	0,288	0,989			
	#2	0,326	1,119	1,135	0,094	9
	#3	0,378	1,297			

Pela análise dos valores do índice apresentados na tabela anterior, que foram calculados tendo como base os valores obtidos para o solo referência, não se observa uma influência positiva da cinza no crescimento das plantas, podendo a cinza exercer algum efeito de fitotoxicidade. Já no que diz respeito ao carbonato de cálcio, verifica-se que a massa de erva obtida foi a mais elevada dos quatro ensaios realizados, mostrando um influência positiva no crescimento das plantas superior à cinza, no estudo experimental realizado, obtendo um índice mais elevado. Não podemos concluir que a aplicação de cinza tem uma influência positiva o crescimento das plantas, mas também não podemos admitir a influência positiva da aplicação de carbonato de cálcio uma vez que os valores do índice são próximos e ambos superiores a 90%.

5. Conclusões

No presente trabalho o objetivo principal foi a avaliação da influência da cinza de biomassa nas características químicas e físicas no perfil de um solo. Foram determinados parâmetros tal como o pH, a condutividade e elementos químicos de interesse para a cinza de biomassa. Determinaram-se também diversos parâmetros, apresentados na tabela 6, para a lama utilizada, assim como para o solo inicial e final e ainda para o lixiviado recolhido. De entre os objetivos do trabalho, pretendia-se analisar a influência da cinza no crescimento das plantas, e o seu efeito na lixiviação dos diferentes elementos químicos analisado.

Recorrendo-se ao teste de lixiviação, onde foram realizadas duas réplicas para as colunas solo referência, duas réplicas para as colunas com cinza + lama, duas réplicas para as colunas com cinza e duas réplicas para as colunas com CaCO_3 , foi possível tirar diversas conclusões, destacando-se as apresentadas em seguida.

De entre as conclusões principais é de destacar que a cinza de biomassa apresenta uma grande influência no pH do lixiviado recolhido, provocando o seu aumento e estabilizando-o com o passar do tempo. Observa-se também a sua grande influência no pH do solo, observando-se valores de pH finais para as colunas de cinza de cerca de 6,6, na camada do topo, através da extração aquosa. É de referir que os valores mais elevados de pH no solo final verificam-se, precisamente nas colunas onde foi aplicada cinza de biomassa, e para ambas as extrações realizadas para determinação do pH.

No que diz respeito ao lixiviado recolhido ao longo do teste, verifica-se que a quantidade dos elementos químicos que é lixiviada representa uma pequena fração em comparação com a quantidade dos mesmos presente no solo, com exceção dos nitratos e do zinco. No caso dos nitratos observa-se que, cerca de metade da massa de nitratos aparece no lixiviado, enquanto os restantes se encontram no solo final. No caso do zinco verifica-se a mesma situação, mas apenas para a extração aquosa realizada ao solo final.

As concentrações de alguns dos elementos químicos analisados nos lixiviados, ultrapassa os valores paramétricos estabelecidos no Decreto-Lei nº 306/2007 relativo a água para consumo humano, principalmente nas colunas onde foi aplicada cinza de biomassa. Isto ocorre apenas para algumas semanas do teste de lixiviação, em elementos como o cálcio, o ferro, o manganês e o cádmio.

Através da análise da distribuição dos elementos químicos analisados, observa-se que os mesmos não se distribuem uniformemente pelas camadas do perfil de solo. Para os elementos presentes em quantidade consideravelmente elevadas a sua distribuição apresenta-se mais uniforme pelas três camadas de perfil de solo. No entanto, aqueles que se encontram em quantidade bastante menores, apresentam uma distribuição mais irregular, e muitas vezes apenas se encontram numa

das camadas do perfil. Esta situação sugere alguma falta de exatidão experimental por se estar a lidar com concentrações próximas do nível de deteção dos métodos quantitativos.

Relativamente ao balanço mássico realizado ao solo, no estado inicial e final os valores obtidos para as massas dos elementos extraídos, são bastante diferentes e as quantidades extraídas através da extração de Mehlich são superiores às quantidades extraídas através da extração aquosa, revelando-se como exceção do cálcio. O facto do cálcio se apresentar em tão pouca quantidade no solo final, através da extração aquosa, pode dever-se à ocorrência de reações no solo que provoquem a diminuição da solubilidade deste elemento. No caso da extração de Mehlich, o cálcio encontra-se em muito maior quantidade no solo final, o que indica um aumento da sua biodisponibilidade. Através desta extração observa-se que a massa extraída do solo final é superior à massa extraída do solo inicial, para a generalidade dos elementos. É importante referir que a massa de cada elemento lixiviada representa uma pequena fração relativamente à massa presente no solo, à exceção do zinco e dos nitratos.

Através do teste de lixiviação, e da realização do balanço mássico ao solo, pode retirar-se uma das conclusões mais importantes do trabalho. A aplicação de lama em conjunto com a cinza de biomassa provocou um aprisionamento de alguns elementos, que não foram extraídos do solo em tão grande quantidade, como nas outras colunas de lixiviação. A composição da lama poderá estar na explicação do sucedido, principalmente o facto de ter cerca de 20% de matéria orgânica na sua constituição. A matéria orgânica será a responsável pelo aprisionamento dos elementos, que, como consequência, não passaram para o solo nem para o lixiviado.

No que respeita ao teste de fitotoxicidade realizado, verificou-se que a aplicação de cinza de biomassa no solo, na carga aplicada, 1 ton/ha, não afeta o crescimento das plantas. É de referir que o teste de fitotoxicidade teve a duração de apenas 15 dias, evidenciando a necessidade da realização de um teste com maior duração, de forma a obter resultados mais precisos, o que poderá ser um dos caminhos para dar continuidade a esta investigação.

Para a continuação deste trabalho, seria interessante a realização de um novo teste de lixiviação, mas com a aplicação de uma carga de cinza mais elevada, de forma a se compreender melhor a sua influência. Outra opção seria a realização de um estudo de aplicação de lama, com diferentes percentagens de matéria orgânica, em conjunto com a aplicação de cinza de biomassa, de forma a conhecer a influência da matéria orgânica no aprisionamento de alguns elementos químicos.

6. Bibliografia

Atlas de Portugal. Acedido em Outubro de 2012.

<http://www.igeo.pt>

Brunner, I., Zimmermann S., Zingg A. e Blaser P., (2004), 'Wood-ash recycling affects forest soil and tree fine-root chemistry and reverses soil acidification', *Plant and Soil*.

Clapham, W. M. e Zibilske, L. M. (1992), 'Wood ash as a liming amendment', *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Clarholm, M. (1994), 'Granulated wood ash and a 'N-free' fertilizer to a forest soil—effects on P availability', *Forest Ecology and Management*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Coelho, A. (2010), 'Gestão de Cinzas produzidas em centrais de cogeração operadas com biomassa', Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Erich, M. S. (1991), 'Agronomic Effectiveness of Wood Ash as a Source of Phosphorus and Potassium', *J. Environ. Qual.*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Etiégni, L. and Campbell, A. G. (1991), 'Physical and chemical characteristics of wood ash', *Bioresource Technology*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Kahl, J. S., et al. (1996), 'Threshold Application Rates of Wood Ash to an Acidic Forest Soil', *J. Environ. Qual.*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Khanna, P.K., Raison, R.J., Falkiner, R.A., (1994), 'Chemical properties of ash derived from Eucalyptus litter and its effects on forest soils' *For. Ecol. Management*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Lodenius, M., (2003), 'Cadmium concentrations in a boreal forest ecosystem after application of wood ash', citado em Brunner, I., Zimmermann S., Zingg A. e Blaser P., (2004), 'Wood-ash recycling affects forest soil and tree fine-root chemistry and reverses soil acidification', *Plant and Soil*.

Ludwig, B., Rumpf S., Mindrup M., Meiwes K-J., Khanna P.K., (2002), 'Effects of Lime and Wood Ash on Soil-solution Chemistry, Soil Chemistry and Nutritional Status of a Pine Stand in Northern Germany', citado em Saarsalmi, A., Smolander A., Kukkola M., Arola M., (2010), 'Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland', *Plant and Soil*.

Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. (1989), 'Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações', citado em Shizuo Maeda, Helton Damin da Silva, Washington Luiz Esteves Magalhães (2007), 'Caracterização Química de Cinza de Biomassa Vegetal e Respostas à sua Aplicação em Latossolo e Cambissolo de Pirai do Sul'.

McDonald, M.A., Hawkins, B.J., Prescott, C.E., Kimmins, J.P., (1994), 'Growth and foliar nutrition of western red cedar fertilized with sewage sludge, pulp sludge, fish silage, and wood ash on northern Vancouver Island', *Can. J. For. Res.*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Muse, John K. and Mitchell, Charles C. (1995), 'Paper Mill Boiler Ash and Lime By-Products as Soil Liming Materials', citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Ohno, T. and Erich, M. S. (1993), 'Incubation-derived calcium carbonate equivalence of papermill boiler ashes derived from sludge and wood sources', *Environmental pollution*, Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Ohno, T., (1992), 'Neutralization of Soil Acidity and Release of Phosphorus and Potassium by Wood Ash', *J. Environ. Qual.*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Pita, P. (2010), 'Valorização Agrícola de Cinza da Co-Combustão de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Biomassa Lenhosa', Tese de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Ribbing, C. (2007), 'Environmentally friendly use of non-coal ashes in Sweden', *Waste Management*.

Saarsalmi, A., Smolander A., Kukkola M., Arola M., (2010), 'Effect of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes, and stand growth in two coniferous stands in Finland', *Plant and Soil*.

Shizuo Maeda, Helton Damin da Silva, Washington Luiz Esteves Magalhães (2007), 'Caracterização Química de Cinza de Biomassa Vegetal e Respostas à sua Aplicação em Latossolo e Cambissolo de Piraí do Sul'.

Silva, D. (2009), 'Efeito do envelhecimento da biomassa sobre as características do biocombustível', Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Someshwar, A.V., (1996), 'Wood ash and combination wood-fired boiler ash characterization', *J. Environ. Qual.*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Ulery, A. L., Graham, R. C., and Amrhein, C. (1993), 'Wood-ash composition and soil pH following intense burning', *Soil Science*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Vance, Eric D. (1996), 'Land Application of Wood-Fired and Combination Boiler Ashes: An Overview', *J. Environ. Qual.*, Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

Wikipedia, (2012). Acedido em Outubro de 2012.

<http://pt.wikipedia.org>

Zhan, G., Erich, M.S., Ohno, T., (1994), 'Release of trace elements from wood ash by nitric acid', *Water Air Soil Pollut*, citado em Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., e Verloo, M. G. (2001), 'Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview', *Bioresource Technology*.

6.1. Legislação consultada

- **Decreto-lei nº 73/2011 de 17 de Julho**, que vem alterar a Lei-quadro dos resíduos, nomeadamente o Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de Outubro, transpondo a Diretiva nº 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro. Estabelece o Regime Geral de Gestão de resíduos e define as prioridades de gestão dos mesmos.
- **Decreto-Lei nº 276/2009 de 2 de Outubro**, que transpõe a Diretiva Europeia 86/278/EC relativa à proteção do ambiente e, em especial, dos solos na utilização agrícola de lamas de depuração. Este apresenta os valores limite de concentração de metais pesados para as lamas de depuração a serem aplicadas em solos agrícolas ou florestais, estabelece também os valores limite nos solos recetores e a quantidade de metais pesados que podem ser anualmente introduzidas em solos cultivados.
- **Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto**, que revê o Decreto-Lei nº 243/2001 de 5 de Setembro, estabelece o regime jurídico de qualidade da água para consumo humano. Este estipula os valores estabelecidos para efeitos de controlo da qualidade da água para consumo humano.
- **Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto**, que pretende melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. Este documento legal estabelece valores máximos admissíveis para vários parâmetros de interesse.
- **Portaria nº 209/2004 de 3 de Março**, onde consta a Lista Europeia de Resíduos (LER), esta assegura a harmonização do normativo vigente em matéria de identificação e classificação dos diferentes tipos de resíduos.

Anexo A – Titulação realizada para determinação do poder neutralizante da cinza

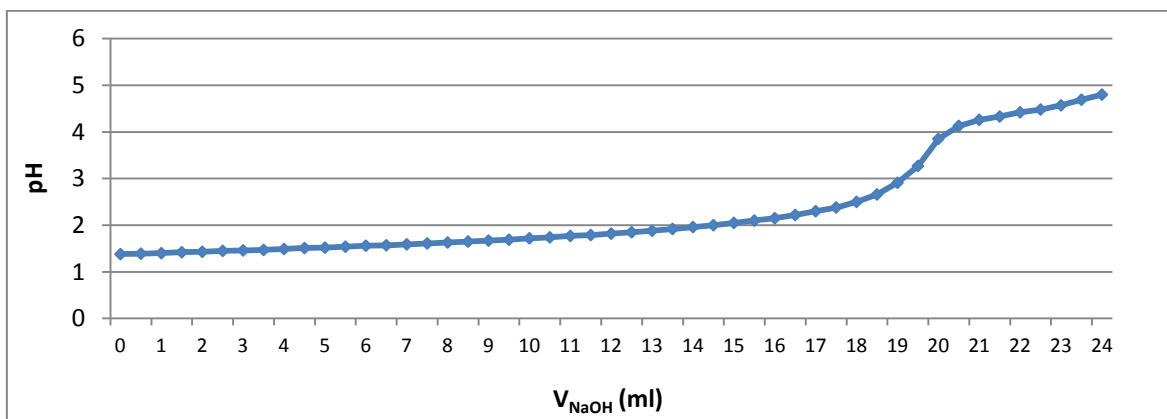


Figura 120 - Curva de titulação da cinza com hidróxido de sódio para determinação do poder neutralizante

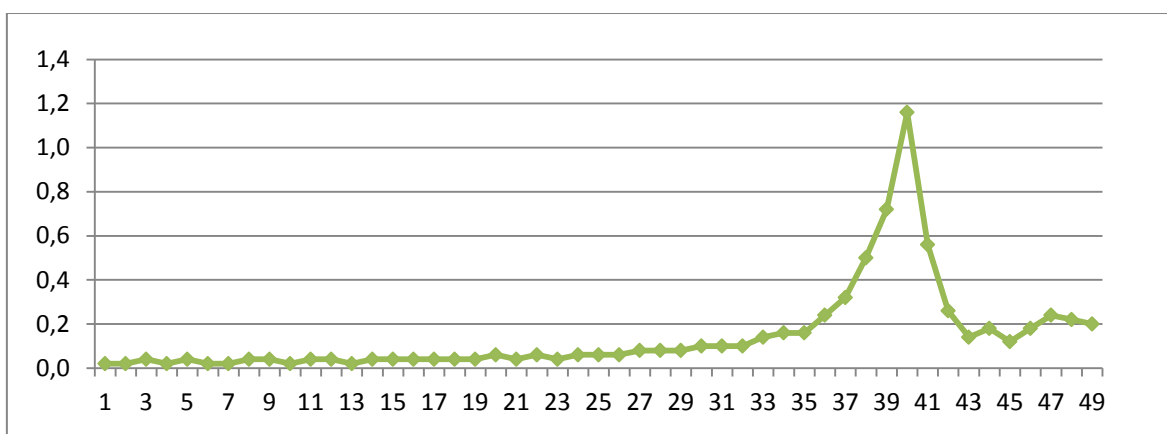


Figura 121 - Determinação do ponto de equivalência da determinação da cinza com hidróxido de sódio através da primeira derivada $\left(\frac{d(pH)}{dV}\right)$ da curva de titulação

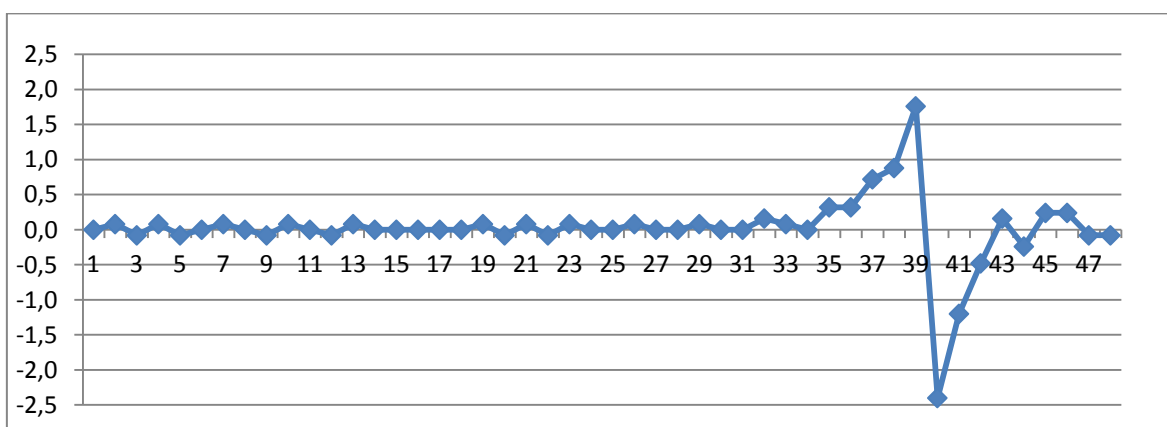


Figura 122 - Determinação do ponto de equivalência da determinação da cinza com hidróxido de sódio através da segunda derivada $\left(\frac{d_2(pH)}{d_2(V)}\right)$ da curva de titulação

Anexo B – Resultados de massa de elemento nas colunas através da extração aquosa

Tabela 25 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna solo referência, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no} solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no} solo final (mg)
P	Topo	9,95E-07	1738,31	1,73		1,84E-06	1738,31	3,21	
	Meio	6,53E-07	1078,27	0,70	3,38	9,59E-07	1078,27	1,03	5,40
	Fundo	6,35E-07	1488,57	0,95		7,78E-07	1488,57	1,16	
Ca	Topo	9,18E-04	1738,31	1595,13		2,51E-04	1738,31	436,64	
	Meio	8,59E-04	1078,27	926,05	3770,24	2,72E-04	1078,27	293,37	1229,79
	Fundo	8,39E-04	1488,57	1249,06		3,36E-04	1488,57	499,79	
Mg	Topo	1,25E-05	1738,31	21,65		1,65E-05	1738,31	28,71	
	Meio	9,02E-06	1078,27	9,73	41,27	2,07E-05	1078,27	22,35	79,09
	Fundo	6,64E-06	1488,57	9,89		1,88E-05	1488,57	28,04	
Na	Topo	1,30E-05	1738,31	22,62		3,30E-05	1738,31	57,37	
	Meio	5,90E-05	1078,27	63,63	112,53	1,01E-05	1078,27	10,91	90,41
	Fundo	1,77E-05	1488,57	26,28		1,49E-05	1488,57	22,14	
K	Topo	1,59E-05	1738,31	27,67		1,60E-05	1738,31	27,82	
	Meio	9,20E-06	1078,27	9,92	58,83	2,24E-05	1078,27	24,12	123,34
	Fundo	1,43E-05	1488,57	21,24		4,80E-05	1488,57	71,39	
Fe	Topo	6,79E-07	1738,31	1,18		1,19E-05	1738,31	20,66	
	Meio	5,09E-07	1078,27	0,55	2,74	3,76E-07	1078,27	0,40	24,43
	Fundo	6,79E-07	1488,57	1,01		2,26E-06	1488,57	3,36	
Mn	Topo	1,12E-06	1738,31	1,94		1,46E-06	1738,31	2,55	
	Meio	1,69E-06	1078,27	1,82	6,39	1,16E-07	1078,27	0,12	3,99
	Fundo	1,77E-06	1488,57	2,63		8,87E-07	1488,57	1,32	
Ni	Topo	0,00	1738,31	0,00		0,00	1738,31	0,00	
	Meio	0,00	1078,27	0,00	0,00	0,00	1078,27	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1488,57	0,00		0,00	1488,57	0,00	
Cu	Topo	6,45E-07	1738,31	1,12		1,11E-06	1738,31	1,93	
	Meio	2,33E-08	1078,27	0,03	1,15	1,01E-06	1078,27	1,09	4,67
	Fundo	0,00E+00	1488,57	0,00		1,11E-06	1488,57	1,65	
Zn	Topo	1,53E-06	1738,31	2,67		1,54E-06	1738,31	2,68	
	Meio	1,23E-06	1078,27	1,33	5,15	0,00E+00	1078,27	0,00	3,04
	Fundo	7,78E-07	1488,57	1,16		2,48E-07	1488,57	0,37	
Cd	Topo	0,00E+00	1738,31	0,00		1,61E-08	1738,31	0,03	
	Meio	1,71E-08	1078,27	0,02	0,08	0,00E+00	1078,27	0,00	0,34
	Fundo	4,14E-08	1488,57	0,06		2,10E-07	1488,57	0,31	
Cr	Topo	1,96E-06	1738,31	3,41		0,00	1738,31	0,00	
	Meio	0,00E+00	1078,27	0,00	3,41	0,00	1078,27	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1488,57	0,00		0,00	1488,57	0,00	

Nitratos	Topo	2,74E-05	1738,31	47,67		1,47E-05	1738,31	25,53	
	Meio	3,93E-05	1078,27	42,42	114,95	5,83E-06	1078,27	6,29	37,70
	Fundo	1,67E-05	1488,57	24,86		3,95E-06	1488,57	5,88	

Tabela 26 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna solo referência, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m_{solo} seco (g)	m_{no solo} inicial (mg)	Σ m_{no} solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_{solo} seco (g)	m_{no solo} final (mg)	Σ m_{no} solo final (mg)
P	Topo	9,95E-07	1329,66	1,32		1,69E-06	1329,66	2,24	
	Meio	6,53E-07	1540,50	1,01	3,38	2,47E-06	1540,50	3,80	7,96
	Fundo	6,35E-07	1658,39	1,05		1,16E-06	1658,39	1,92	
Ca	Topo	9,18E-04	1329,66	1220,14		5,89E-04	1329,66	783,68	
	Meio	8,59E-04	1540,50	1323,02	3934,72	2,72E-04	1540,50	419,30	1619,20
	Fundo	8,39E-04	1658,39	1391,56		2,51E-04	1658,39	416,23	
Mg	Topo	1,25E-05	1329,66	16,56		2,18E-05	1329,66	28,96	
	Meio	9,02E-06	1540,50	13,90	41,48	2,01E-05	1540,50	30,90	93,49
	Fundo	6,64E-06	1658,39	11,02		2,03E-05	1658,39	33,63	
Na	Topo	1,30E-05	1329,66	17,30		1,50E-05	1329,66	19,90	
	Meio	5,90E-05	1540,50	90,91	137,49	1,97E-05	1540,50	30,32	65,75
	Fundo	1,77E-05	1658,39	29,28		9,36E-06	1658,39	15,52	
K	Topo	1,59E-05	1329,66	21,16		2,71E-05	1329,66	36,01	
	Meio	9,20E-06	1540,50	14,18	59,00	2,84E-05	1540,50	43,75	120,57
	Fundo	1,43E-05	1658,39	23,66		2,46E-05	1658,39	40,82	
Fe	Topo	6,79E-07	1329,66	0,90		7,66E-06	1329,66	10,19	
	Meio	5,09E-07	1540,50	0,78	2,81	1,24E-05	1540,50	19,03	30,23
	Fundo	6,79E-07	1658,39	1,13		6,10E-07	1658,39	1,01	
Mn	Topo	1,12E-06	1329,66	1,49		0,00E+00	1329,66	0,00	
	Meio	1,69E-06	1540,50	2,60	7,01	5,01E-07	1540,50	0,77	0,77
	Fundo	1,77E-06	1658,39	2,93		0,00E+00	1658,39	0,00	
Ni	Topo	0,00	1329,66	0,00		0,00	1329,66	0,00	
	Meio	0,00	1540,50	0,00	0,00	0,00	1540,50	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1658,39	0,00		0,00	1658,39	0,00	
Cu	Topo	6,45E-07	1329,66	0,86		1,11E-06	1329,66	1,48	
	Meio	2,33E-08	1540,50	0,04	0,89	1,31E-06	1540,50	2,02	5,50
	Fundo	0,00E+00	1658,39	0,00		1,21E-06	1658,39	2,00	
Zn	Topo	1,53E-06	1329,66	2,04		2,85E-08	1329,66	0,04	
	Meio	1,23E-06	1540,50	1,90	5,23	8,16E-07	1540,50	1,26	1,42
	Fundo	7,78E-07	1658,39	1,29		7,22E-08	1658,39	0,12	
Cd	Topo	0,00E+00	1329,66	0,00		0,00E+00	1329,66	0,00	
	Meio	1,71E-08	1540,50	0,03	0,09	4,84E-08	1540,50	0,07	0,21
	Fundo	4,14E-08	1658,39	0,07		8,07E-08	1658,39	0,13	
Cr	Topo	1,96E-06	1329,66	2,61		0,00	1329,66	0,00	
	Meio	0,00E+00	1540,50	0,00	2,61	0,00	1540,50	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1658,39	0,00		0,00	1658,39	0,00	

Nitratos	Topo	2,74E-05	1329,66	36,46		1,88E-05	1329,66	25,00	
	Meio	3,93E-05	1540,50	60,61	124,76	1,70E-05	1540,50	26,25	70,20
	Fundo	1,67E-05	1658,39	27,69		1,14E-05	1658,39	18,96	

Tabela 27 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo inicial (mg)	Σ m_no solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo final (mg)	Σ m_no solo final (mg)
P	Topo	9,95E-07	1176,34	1,17		7,11E-07	1176,34	0,84	
	Meio	6,53E-07	1548,13	1,01	3,34	6,79E-07	1548,13	1,05	2,87
	Fundo	6,35E-07	1817,62	1,15		5,40E-07	1817,62	0,98	
Ca	Topo	9,18E-04	1176,34	1079,45		3,87E-04	1176,34	454,89	
	Meio	8,59E-04	1548,13	1329,57	3934,19	3,02E-04	1548,13	467,57	1472,08
	Fundo	8,39E-04	1817,62	1525,17		3,02E-04	1817,62	549,62	
Mg	Topo	1,25E-05	1176,34	14,65		1,75E-05	1176,34	20,58	
	Meio	9,02E-06	1548,13	13,97	40,69	1,74E-05	1548,13	27,00	75,55
	Fundo	6,64E-06	1817,62	12,07		1,54E-05	1817,62	27,96	
Na	Topo	1,30E-05	1176,34	15,31		5,99E-06	1176,34	7,05	
	Meio	5,90E-05	1548,13	91,36	138,76	7,96E-06	1548,13	12,33	43,62
	Fundo	1,77E-05	1817,62	32,09		1,33E-05	1817,62	24,25	
K	Topo	1,59E-05	1176,34	18,72		2,46E-05	1176,34	28,88	
	Meio	9,20E-06	1548,13	14,25	58,91	1,96E-05	1548,13	30,36	96,78
	Fundo	1,43E-05	1817,62	25,94		2,06E-05	1817,62	37,53	
Fe	Topo	6,79E-07	1176,34	0,80		3,01E-07	1176,34	0,35	
	Meio	5,09E-07	1548,13	0,79	2,82	2,18E-06	1548,13	3,37	5,64
	Fundo	6,79E-07	1817,62	1,23		1,05E-06	1817,62	1,91	
Mn	Topo	1,12E-06	1176,34	1,32		0,00E+00	1176,34	0,00	
	Meio	1,69E-06	1548,13	2,61	7,14	0,00E+00	1548,13	0,00	0,45
	Fundo	1,77E-06	1817,62	3,21		2,47E-07	1817,62	0,45	
Ni	Topo	0,00	1176,34	0,00		0,00	1176,34	0,00	
	Meio	0,00	1548,13	0,00	0,00	0,00	1548,13	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1817,62	0,00		0,00	1817,62	0,00	
Cu	Topo	6,45E-07	1176,34	0,76		8,87E-07	1176,34	1,04	
	Meio	2,33E-08	1548,13	0,04	0,79	9,67E-07	1548,13	1,50	4,44
	Fundo	0,00E+00	1817,62	0,00		1,05E-06	1817,62	1,90	
Zn	Topo	1,53E-06	1176,34	1,81		0,00	1176,34	0,00	
	Meio	1,23E-06	1548,13	1,91	5,13	0,00	1548,13	0,00	0,00
	Fundo	7,78E-07	1817,62	1,41		0,00	1817,62	0,00	
Cd	Topo	0,00E+00	1176,34	0,00		0,00E+00	1176,34	0,00	
	Meio	1,71E-08	1548,13	0,03	0,10	1,68E-07	1548,13	0,26	0,26
	Fundo	4,14E-08	1817,62	0,08		0,00E+00	1817,62	0,00	
Cr	Topo	1,96E-06	1176,34	2,30		0,00	1176,34	0,00	
	Meio	0,00E+00	1548,13	0,00	2,30	0,00	1548,13	0,00	0,00

	Fundo	0,00E+00	1817,62	0,00		0,00	1817,62	0,00	
	Topo	2,74E-05	1176,34	32,26		1,82E-05	1176,34	21,36	
Nitratos	Meio	3,93E-05	1548,13	60,91	123,52	9,07E-06	1548,13	14,04	42,17
	Fundo	1,67E-05	1817,62	30,35		3,73E-06	1817,62	6,78	

Tabela 28 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m_{solo} seco (g)	m_{no solo} inicial (mg)	Σ m_{no} solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_{solo} seco (g)	m_{no solo} final (mg)	Σ m_{no} solo final (mg)
P	Topo	9,95E-07	1372,01	1,37		8,50E-07	1372,01	1,17	
	Meio	6,53E-07	1525,83	1,00	3,34	6,03E-07	1525,83	0,92	2,79
	Fundo	6,35E-07	1537,16	0,98		4,58E-07	1537,16	0,70	
Ca	Topo	9,18E-04	1372,01	1259,00		3,19E-04	1372,01	438,23	
	Meio	8,59E-04	1525,83	1310,42	3859,26	3,02E-04	1525,83	461,02	1337,57
	Fundo	8,39E-04	1537,16	1289,84		2,85E-04	1537,16	438,32	
Mg	Topo	1,25E-05	1372,01	17,09		1,80E-05	1372,01	24,65	
	Meio	9,02E-06	1525,83	13,77	41,07	1,77E-05	1525,83	26,97	72,39
	Fundo	6,64E-06	1537,16	10,21		1,35E-05	1537,16	20,78	
Na	Topo	1,30E-05	1372,01	17,85		7,58E-06	1372,01	10,40	
	Meio	5,90E-05	1525,83	90,05	135,04	1,08E-05	1525,83	16,45	48,46
	Fundo	1,77E-05	1537,16	27,14		1,41E-05	1537,16	21,61	
K	Topo	1,59E-05	1372,01	21,84		7,27E-05	1372,01	99,71	
	Meio	9,20E-06	1525,83	14,04	57,81	2,42E-05	1525,83	36,99	163,57
	Fundo	1,43E-05	1537,16	21,93		1,75E-05	1537,16	26,87	
Fe	Topo	6,79E-07	1372,01	0,93		3,01E-07	1372,01	0,41	
	Meio	5,09E-07	1525,83	0,78	2,75	0,00E+00	1525,83	0,00	0,41
	Fundo	6,79E-07	1537,16	1,04		0,00E+00	1537,16	0,00	
Mn	Topo	1,12E-06	1372,01	1,53		0,00E+00	1372,01	0,00	
	Meio	1,69E-06	1525,83	2,57	6,82	9,25E-08	1525,83	0,14	0,99
	Fundo	1,77E-06	1537,16	2,71		5,55E-07	1537,16	0,85	
Ni	Topo	0,00	1372,01	0,00		0,00	1372,01	0,00	
	Meio	0,00	1525,83	0,00	0,00	0,00	1525,83	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1537,16	0,00		0,00	1537,16	0,00	
Cu	Topo	6,45E-07	1372,01	0,88		1,05E-06	1372,01	1,44	
	Meio	2,33E-08	1525,83	0,04	0,92	1,05E-06	1525,83	1,60	4,64
	Fundo	0,00E+00	1537,16	0,00		1,05E-06	1537,16	1,61	
Zn	Topo	1,53E-06	1372,01	2,11		0,00E+00	1372,01	0,00	
	Meio	1,23E-06	1525,83	1,88	5,18	0,00E+00	1525,83	0,00	0,01
	Fundo	7,78E-07	1537,16	1,20		5,25E-09	1537,16	0,01	
Cd	Topo	0,00E+00	1372,01	0,00		9,06E-08	1372,01	0,12	
	Meio	1,71E-08	1525,83	0,03	0,09	0,00E+00	1525,83	0,00	0,12
	Fundo	4,14E-08	1537,16	0,06		0,00E+00	1537,16	0,00	
Cr	Topo	1,96E-06	1372,01	2,69	2,69	0,00	1372,01	0,00	0,00

	Meio	0,00E+00	1525,83	0,00		0,00	1525,83	0,00	
	Fundo	0,00E+00	1537,16	0,00		0,00	1537,16	0,00	
Nitratos	Topo	2,74E-05	1372,01	37,63		1,87E-05	1372,01	25,65	
	Meio	3,93E-05	1525,83	60,03	123,32	8,73E-06	1525,83	13,33	41,93
	Fundo	1,67E-05	1537,16	25,67		1,92E-06	1537,16	2,95	

Tabela 29 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo inicial (mg)	Σ m_no solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo final (mg)	Σ m_no solo final (mg)
P	Topo	9,95E-07	1264,93	1,26		7,80E-07	1264,93	0,99	
	Meio	6,53E-07	1551,11	1,01	3,38	9,69E-07	1551,11	1,50	3,45
	Fundo	6,35E-07	1750,83	1,11		5,47E-07	1750,83	0,96	
Ca	Topo	9,18E-04	1264,93	1160,74		4,04E-04	1264,93	510,50	
	Meio	8,59E-04	1551,11	1332,13	3962,00	3,70E-04	1551,11	573,16	1731,40
	Fundo	8,39E-04	1750,83	1469,13		3,70E-04	1750,83	647,73	
Mg	Topo	1,25E-05	1264,93	15,75		1,64E-05	1264,93	20,76	
	Meio	9,02E-06	1551,11	14,00	41,38	1,77E-05	1551,11	27,40	76,37
	Fundo	6,64E-06	1750,83	11,63		1,61E-05	1750,83	28,20	
Na	Topo	1,30E-05	1264,93	16,46		3,02E-06	1264,93	3,82	
	Meio	5,90E-05	1551,11	91,54	138,91	3,35E-05	1551,11	51,97	85,57
	Fundo	1,77E-05	1750,83	30,91		1,70E-05	1750,83	29,78	
K	Topo	1,59E-05	1264,93	20,13		2,68E-05	1264,93	33,88	
	Meio	9,20E-06	1551,11	14,27	59,39	4,16E-05	1551,11	64,49	143,60
	Fundo	1,43E-05	1750,83	24,98		2,58E-05	1750,83	45,23	
Fe	Topo	6,79E-07	1264,93	0,86		1,62E-06	1264,93	2,04	
	Meio	5,09E-07	1551,11	0,79	2,84	1,61E-06	1551,11	2,50	8,70
	Fundo	6,79E-07	1750,83	1,19		2,37E-06	1750,83	4,15	
Mn	Topo	1,12E-06	1264,93	1,41		0,00E+00	1264,93	0,00	
	Meio	1,69E-06	1551,11	2,62	7,12	2,47E-07	1551,11	0,38	0,81
	Fundo	1,77E-06	1750,83	3,09		2,47E-07	1750,83	0,43	
Ni	Topo	0,00	1264,93	0,00		0,00	1264,93	0,00	
	Meio	0,00	1551,11	0,00	0,00	0,00	1551,11	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1750,83	0,00		0,00	1750,83	0,00	
Cu	Topo	6,45E-07	1264,93	0,82		1,05E-06	1264,93	1,32	
	Meio	2,33E-08	1551,11	0,04	0,85	1,05E-06	1551,11	1,62	4,78
	Fundo	0,00E+00	1750,83	0,00		1,05E-06	1750,83	1,83	
Zn	Topo	1,53E-06	1264,93	1,94		0,00E+00	1264,93	0,00	
	Meio	1,23E-06	1551,11	1,91	5,21	2,15E-07	1551,11	0,33	0,47
	Fundo	7,78E-07	1750,83	1,36		7,53E-08	1750,83	0,13	
Cd	Topo	0,00E+00	1264,93	0,00		0,00E+00	1264,93	0,00	
	Meio	1,71E-08	1551,11	0,03	0,10	1,29E-08	1551,11	0,02	0,02
	Fundo	4,14E-08	1750,83	0,07		0,00E+00	1750,83	0,00	

	Topo	1,96E-06	1264,93	2,48		0,00	1264,93	0,00	
Cr	Meio	0,00E+00	1551,11	0,00	2,48	0,00	1551,11	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1750,83	0,00		0,00	1750,83	0,00	
	Topo	2,74E-05	1264,93	34,69		2,54E-05	1264,93	32,07	
Nitratos	Meio	3,93E-05	1551,11	61,03	124,95	1,26E-05	1551,11	19,56	60,86
	Fundo	1,67E-05	1750,83	29,23		5,27E-06	1750,83	9,23	

Tabela 30 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m_{solo} seco (g)	m_{no solo} inicial (mg)	Σ m_{no} solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_{solo} seco (g)	m_{no solo} final (mg)	Σ m_{no} solo final (mg)
	Topo	9,95E-07	1123,88	1,12		9,38E-07	1123,88	1,05	
P	Meio	6,53E-07	1287,86	0,84	3,06	8,99E-07	1287,86	1,16	3,16
	Fundo	6,35E-07	1728,77	1,10		5,46E-07	1728,77	0,94	
	Topo	9,18E-04	1123,88	1031,31		7,07E-04	1123,88	794,87	
Ca	Meio	8,59E-04	1287,86	1106,05	3587,97	2,68E-04	1287,86	345,37	1633,39
	Fundo	8,39E-04	1728,77	1450,62		2,85E-04	1728,77	493,16	
	Topo	1,25E-05	1123,88	14,00		1,88E-05	1123,88	21,18	
Mg	Meio	9,02E-06	1287,86	11,62	37,10	1,91E-05	1287,86	24,60	69,47
	Fundo	6,64E-06	1728,77	11,48		1,37E-05	1728,77	23,69	
	Topo	1,30E-05	1123,88	14,62		5,84E-06	1123,88	6,57	
Na	Meio	5,90E-05	1287,86	76,00	121,15	7,82E-06	1287,86	10,07	36,45
	Fundo	1,77E-05	1728,77	30,52		1,15E-05	1728,77	19,81	
	Topo	1,59E-05	1123,88	17,89		3,32E-05	1123,88	37,36	
K	Meio	9,20E-06	1287,86	11,85	54,41	3,09E-05	1287,86	39,80	123,00
	Fundo	1,43E-05	1728,77	24,67		2,65E-05	1728,77	45,84	
	Topo	6,79E-07	1123,88	0,76		1,13E-07	1123,88	0,13	
Fe	Meio	5,09E-07	1287,86	0,66	2,59	0,00E+00	1287,86	0,00	0,13
	Fundo	6,79E-07	1728,77	1,17		0,00E+00	1728,77	0,00	
	Topo	1,12E-06	1123,88	1,26		0,00E+00	1123,88	0,00	
Mn	Meio	1,69E-06	1287,86	2,17	6,48	0,00E+00	1287,86	0,00	0,96
	Fundo	1,77E-06	1728,77	3,05		5,55E-07	1728,77	0,96	
	Topo	0,00	1123,88	0,00		0,00	1123,88	0,00	
Ni	Meio	0,00	1287,86	0,00	0,00	0,00	1287,86	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1728,77	0,00		0,00	1728,77	0,00	
	Topo	6,45E-07	1123,88	0,72		1,13E-06	1123,88	1,27	
Cu	Meio	2,33E-08	1287,86	0,03	0,75	1,13E-06	1287,86	1,45	4,53
	Fundo	0,00E+00	1728,77	0,00		1,05E-06	1728,77	1,81	
	Topo	1,53E-06	1123,88	1,72		5,25E-09	1123,88	0,01	
Zn	Meio	1,23E-06	1287,86	1,59	4,66	4,02E-08	1287,86	0,05	0,31
	Fundo	7,78E-07	1728,77	1,34		1,45E-07	1728,77	0,25	
	Topo	0,00E+00	1123,88	0,00		0,00E+00	1123,88	0,00	
Cd	Meio	1,71E-08	1287,86	0,02	0,09	9,04E-08	1287,86	0,12	0,12

	Fundo	4,14E-08	1728,77	0,07		0,00E+00	1728,77	0,00	
	Topo	1,96E-06	1123,88	2,20		0,00	1123,88	0,00	
Cr	Meio	0,00E+00	1287,86	0,00	2,20	0,00	1287,86	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1728,77	0,00		0,00	1728,77	0,00	
	Topo	2,74E-05	1123,88	30,82		2,42E-05	1123,88	27,17	
Nitratos	Meio	3,93E-05	1287,86	50,67	110,36	1,49E-05	1287,86	19,19	56,57
	Fundo	1,67E-05	1728,77	28,87		5,91E-06	1728,77	10,22	

Tabela 31 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de CaCO₃, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo inicial (mg)	Σ m_no solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo final (mg)	Σ m_no solo final (mg)
	Topo	9,95E-07	1201,71	1,20		8,40E-07	1201,71	1,01	
P	Meio	6,53E-07	1538,15	1,00	3,31	1,05E-06	1538,15	1,62	3,27
	Fundo	6,35E-07	1744,64	1,11		3,67E-07	1744,64	0,64	
	Topo	9,18E-04	1201,71	1102,73		8,20E-04	1201,71	985,93	
Ca	Meio	8,59E-04	1538,15	1321,00	3887,66	3,36E-04	1538,15	516,43	2014,45
	Fundo	8,39E-04	1744,64	1463,93		2,94E-04	1744,64	512,08	
	Topo	1,25E-05	1201,71	14,97		2,28E-05	1201,71	27,35	
Mg	Meio	9,02E-06	1538,15	13,88	40,44	2,49E-05	1538,15	38,26	94,43
	Fundo	6,64E-06	1744,64	11,59		1,65E-05	1744,64	28,82	
	Topo	1,30E-05	1201,71	15,64		3,37E-06	1201,71	4,05	
Na	Meio	5,90E-05	1538,15	90,77	137,21	1,01E-05	1538,15	15,50	47,06
	Fundo	1,77E-05	1744,64	30,80		1,58E-05	1744,64	27,50	
	Topo	1,59E-05	1201,71	19,13		2,64E-05	1201,71	31,68	
K	Meio	9,20E-06	1538,15	14,15	58,18	3,09E-05	1538,15	47,59	118,39
	Fundo	1,43E-05	1744,64	24,89		2,24E-05	1744,64	39,12	
	Topo	6,79E-07	1201,71	0,82		2,02E-06	1201,71	2,43	
Fe	Meio	5,09E-07	1538,15	0,78	2,78	1,41E-07	1538,15	0,22	4,94
	Fundo	6,79E-07	1744,64	1,18		1,32E-06	1744,64	2,30	
	Topo	1,12E-06	1201,71	1,34		0,00E+00	1201,71	0,00	
Mn	Meio	1,69E-06	1538,15	2,59	7,02	3,09E-07	1538,15	0,47	1,69
	Fundo	1,77E-06	1744,64	3,08		6,94E-07	1744,64	1,21	
	Topo	0,00	1201,71	0,00		0,00	1201,71	0,00	
Ni	Meio	0,00	1538,15	0,00	0,00	0,00	1538,15	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1744,64	0,00		0,00	1744,64	0,00	
	Topo	6,45E-07	1201,71	0,77		1,31E-06	1201,71	1,57	
Cu	Meio	2,33E-08	1538,15	0,04	0,81	1,41E-06	1538,15	2,17	6,20
	Fundo	0,00E+00	1744,64	0,00		1,41E-06	1744,64	2,46	
	Topo	1,53E-06	1201,71	1,84		0,00E+00	1201,71	0,00	
Zn	Meio	1,23E-06	1538,15	1,90	5,10	9,42E-08	1538,15	0,14	0,19
	Fundo	7,78E-07	1744,64	1,36		2,85E-08	1744,64	0,05	
Cd	Topo	0,00E+00	1201,71	0,00	0,10	0,00E+00	1201,71	0,00	0,22

	Meio	1,71E-08	1538,15	0,03		4,85E-08	1538,15	0,07	
	Fundo	4,14E-08	1744,64	0,07		8,08E-08	1744,64	0,14	
	Topo	1,96E-06	1201,71	2,35		0,00	1201,71	0,00	
Cr	Meio	0,00E+00	1538,15	0,00	2,35	0,00	1538,15	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1744,64	0,00		0,00	1744,64	0,00	
	Topo	2,74E-05	1201,71	32,95		2,01E-05	1201,71	24,14	
Nitratos	Meio	3,93E-05	1538,15	60,52	122,60	1,63E-05	1538,15	25,14	59,71
	Fundo	1,67E-05	1744,64	29,13		5,98E-06	1744,64	10,43	

Tabela 32 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de CaCO₃, extração aquosa

	Camada	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo inicial (mg)	Σ m_no solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo final (mg)	Σ m_no solo final (mg)
	Topo	9,95E-07	1644,22	1,64		1,05E-06	1644,22	1,73	
P	Meio	6,53E-07	1503,07	0,98	3,65	8,57E-07	1503,07	1,29	4,67
	Fundo	6,35E-07	1625,40	1,03		1,01E-06	1625,40	1,65	
	Topo	9,18E-04	1644,22	1508,79		3,35E-04	1644,22	551,60	
Ca	Meio	8,59E-04	1503,07	1290,88	4163,54	4,62E-04	1503,07	694,81	1791,93
	Fundo	8,39E-04	1625,40	1363,88		3,36E-04	1625,40	545,51	
	Topo	1,25E-05	1644,22	20,48		2,20E-05	1644,22	36,14	
Mg	Meio	9,02E-06	1503,07	13,56	44,84	2,14E-05	1503,07	32,11	102,70
	Fundo	6,64E-06	1625,40	10,80		2,12E-05	1625,40	34,45	
	Topo	1,30E-05	1644,22	21,40		5,99E-06	1644,22	9,85	
Na	Meio	5,90E-05	1503,07	88,70	138,79	1,21E-05	1503,07	18,25	56,88
	Fundo	1,77E-05	1625,40	28,69		1,77E-05	1625,40	28,78	
	Topo	1,59E-05	1644,22	26,17		3,03E-05	1644,22	49,87	
K	Meio	9,20E-06	1503,07	13,83	63,20	2,39E-05	1503,07	35,99	113,07
	Fundo	1,43E-05	1625,40	23,19		1,67E-05	1625,40	27,21	
	Topo	6,79E-07	1644,22	1,12		0,00E+00	1644,22	0,00	
Fe	Meio	5,09E-07	1503,07	0,77	2,99	0,00E+00	1503,07	0,00	2,52
	Fundo	6,79E-07	1625,40	1,10		1,55E-06	1625,40	2,52	
	Topo	1,12E-06	1644,22	1,84		0,00E+00	1644,22	0,00	
Mn	Meio	1,69E-06	1503,07	2,54	7,24	0,00E+00	1503,07	0,00	0,81
	Fundo	1,77E-06	1625,40	2,87		5,01E-07	1625,40	0,81	
	Topo	0,00	1644,22	0,00		0,00	1644,22	0,00	
Ni	Meio	0,00	1503,07	0,00	0,00	0,00	1503,07	0,00	0,00
	Fundo	0,00	1625,40	0,00		0,00	1625,40	0,00	
	Topo	6,45E-07	1644,22	1,06		1,41E-06	1644,22	2,32	
Cu	Meio	2,33E-08	1503,07	0,04	1,10	1,41E-06	1503,07	2,12	6,72
	Fundo	0,00E+00	1625,40	0,00		1,41E-06	1625,40	2,29	
	Topo	1,53E-06	1644,22	2,52		1,60E-07	1644,22	0,26	
Zn	Meio	1,23E-06	1503,07	1,85	5,64	0,00E+00	1503,07	0,00	0,26
	Fundo	7,78E-07	1625,40	1,26		0,00E+00	1625,40	0,00	

Cd	Topo	0,00E+00	1644,22	0,00		4,84E-08	1644,22	0,08	
	Meio	1,71E-08	1503,07	0,03	0,09	0,00E+00	1503,07	0,00	0,08
	Fundo	4,14E-08	1625,40	0,07		0,00E+00	1625,40	0,00	
Cr	Topo	1,96E-06	1644,22	3,22		0,00	1644,22	0,00	
	Meio	0,00E+00	1503,07	0,00	3,22	0,00	1503,07	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1625,40	0,00		0,00	1625,40	0,00	
Nitratos	Topo	2,74E-05	1644,22	45,09		1,67E-05	1644,22	27,47	
	Meio	3,93E-05	1503,07	59,14	131,37	7,95E-06	1503,07	11,96	45,77
	Fundo	1,67E-05	1625,40	27,14		3,90E-06	1625,40	6,35	

Anexo C – Resultados de massa de elemento nas colunas através da extração de Mehlich

Tabela 33 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna solo referência, extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no solo} inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no solo} final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1738,31	2,33		6,36E-05	1738,31	110,61	
	Meio	1,86E-06	1078,27	2,01	7,41	6,38E-05	1078,27	68,75	271,91
	Fundo	2,06E-06	1488,57	3,07		6,22E-05	1488,57	92,55	
Ca	Topo	3,63E-04	1738,31	630,22		7,25E-04	1738,31	1260,44	
	Meio	4,30E-04	1078,27	463,30	1541,02	1,12E-03	1078,27	1204,15	3467,25
	Fundo	3,01E-04	1488,57	447,50		6,74E-04	1488,57	1002,65	
Mg	Topo	3,01E-05	1738,31	52,25		3,60E-05	1738,31	62,53	
	Meio	2,66E-05	1078,27	28,71	113,80	4,94E-05	1078,27	53,32	165,72
	Fundo	2,21E-05	1488,57	32,84		3,35E-05	1488,57	49,87	
Na	Topo	1,50E-03	1738,31	2602,74		1,39E-03	1738,31	2411,98	
	Meio	1,38E-03	1078,27	1489,09	6056,96	1,38E-03	1078,27	1486,94	5838,95
	Fundo	1,32E-03	1488,57	1965,14		1,30E-03	1488,57	1940,03	
K	Topo	3,10E-05	1738,31	53,95		1,69E-05	1738,31	29,43	
	Meio	1,94E-04	1078,27	209,46	300,52	1,08E-04	1078,27	116,64	172,42
	Fundo	2,49E-05	1488,57	37,10		1,77E-05	1488,57	26,35	
Fe	Topo	3,27E-04	1738,31	569,28		6,18E-04	1738,31	1074,94	
	Meio	4,09E-04	1078,27	440,77	1665,38	5,08E-04	1078,27	547,35	2485,14
	Fundo	4,40E-04	1488,57	655,33		5,80E-04	1488,57	862,86	
Mn	Topo	2,23E-06	1738,31	3,88		6,66E-06	1738,31	11,58	
	Meio	2,04E-06	1078,27	2,20	12,52	1,38E-05	1078,27	14,84	36,93
	Fundo	4,33E-06	1488,57	6,44		7,06E-06	1488,57	10,51	
Ni	Topo	0,00E+00	1738,31	0,00		0,00	1738,31	0,00	
	Meio	3,61E-08	1078,27	0,04	0,04	0,00	1078,27	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1488,57	0,00		0,00	1488,57	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1738,31	15,11		1,82E-05	1738,31	31,59	
	Meio	8,68E-06	1078,27	9,35	40,00	1,98E-05	1078,27	21,30	79,85
	Fundo	1,04E-05	1488,57	15,54		1,81E-05	1488,57	26,96	
Zn	Topo	1,27E-06	1738,31	2,22		3,61E-06	1738,31	6,28	
	Meio	1,45E-06	1078,27	1,56	6,44	3,87E-06	1078,27	4,18	16,08
	Fundo	1,79E-06	1488,57	2,67		3,77E-06	1488,57	5,62	
Cd	Topo	1,78E-07	1738,31	0,31		1,45E-07	1738,31	0,25	
	Meio	2,74E-07	1078,27	0,30	0,72	1,61E-08	1078,27	0,02	0,58
	Fundo	8,03E-08	1488,57	0,12		2,10E-07	1488,57	0,31	
Cr	Topo	1,18E-07	1738,31	0,20		0,00	1738,31	0,00	
	Meio	1,18E-07	1078,27	0,13	0,51	0,00	1078,27	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1488,57	0,17		0,00	1488,57	0,00	

Tabela 34 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna solo referência, extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo inicial (mg)	Σ m_no solo inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m_solo seco (g)	m_no solo final (mg)	Σ m_no solo final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1329,66	1,78		5,56E-05	1329,66	73,97	
	Meio	1,86E-06	1540,50	2,87	8,07	5,28E-05	1540,50	81,40	248,26
	Fundo	2,06E-06	1658,39	3,42		5,60E-05	1658,39	92,89	
Ca	Topo	3,63E-04	1329,66	482,07		1,12E-03	1329,66	1493,44	
	Meio	4,30E-04	1540,50	661,91	1642,53	9,60E-04	1540,50	1479,19	4669,39
	Fundo	3,01E-04	1658,39	498,55		1,02E-03	1658,39	1696,77	
Mg	Topo	3,01E-05	1329,66	39,97		4,60E-05	1329,66	61,20	
	Meio	2,66E-05	1540,50	41,01	117,57	4,05E-05	1540,50	62,42	200,72
	Fundo	2,21E-05	1658,39	36,58		4,65E-05	1658,39	77,10	
Na	Topo	1,50E-03	1329,66	1990,87		1,31E-03	1329,66	1740,67	
	Meio	1,38E-03	1540,50	2127,43	6307,63	1,42E-03	1540,50	2183,57	6055,88
	Fundo	1,32E-03	1658,39	2189,33		1,29E-03	1658,39	2131,65	
K	Topo	3,10E-05	1329,66	41,27		1,05E-04	1329,66	139,60	
	Meio	1,94E-04	1540,50	299,26	381,86	7,48E-05	1540,50	115,23	325,31
	Fundo	2,49E-05	1658,39	41,34		4,25E-05	1658,39	70,47	
Fe	Topo	3,27E-04	1329,66	435,45		5,19E-04	1329,66	689,85	
	Meio	4,09E-04	1540,50	629,73	1795,27	4,90E-04	1540,50	754,60	2392,27
	Fundo	4,40E-04	1658,39	730,09		5,72E-04	1658,39	947,82	
Mn	Topo	2,23E-06	1329,66	2,97		1,36E-05	1329,66	18,03	
	Meio	2,04E-06	1540,50	3,14	13,28	7,63E-06	1540,50	11,75	50,64
	Fundo	4,33E-06	1658,39	7,18		1,26E-05	1658,39	20,86	
Ni	Topo	0,00E+00	1329,66	0,00		0,00	1329,66	0,00	
	Meio	3,61E-08	1540,50	0,06	0,06	0,00	1540,50	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1658,39	0,00		0,00	1658,39	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1329,66	11,56		1,92E-05	1329,66	25,57	
	Meio	8,68E-06	1540,50	13,36	42,23	1,68E-05	1540,50	25,87	83,11
	Fundo	1,04E-05	1658,39	17,31		1,91E-05	1658,39	31,67	
Zn	Topo	1,27E-06	1329,66	1,69		5,46E-06	1329,66	7,26	
	Meio	1,45E-06	1540,50	2,23	6,89	3,92E-06	1540,50	6,05	20,11
	Fundo	1,79E-06	1658,39	2,97		4,10E-06	1658,39	6,80	
Cd	Topo	1,78E-07	1329,66	0,24		2,42E-07	1329,66	0,32	
	Meio	2,74E-07	1540,50	0,42	0,79	2,43E-07	1540,50	0,37	0,99
	Fundo	8,03E-08	1658,39	0,13		1,77E-07	1658,39	0,29	
Cr	Topo	1,18E-07	1329,66	0,16		0,00	1329,66	0,00	
	Meio	1,18E-07	1540,50	0,18	0,53	0,00	1540,50	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1658,39	0,19		0,00	1658,39	0,00	

Tabela 35 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no solo} inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no solo} final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1176,34	1,58		5,09E-05	1176,34	59,89	
	Meio	1,86E-06	1548,13	2,88	8,21	5,09E-05	1548,13	78,82	214,20
	Fundo	2,06E-06	1817,62	3,75		4,15E-05	1817,62	75,49	
Ca	Topo	3,63E-04	1176,34	426,48		1,61E-03	1176,34	1897,61	
	Meio	4,30E-04	1548,13	665,18	1638,09	1,10E-03	1548,13	1707,20	5296,81
	Fundo	3,01E-04	1817,62	546,42		9,31E-04	1817,62	1692,00	
Mg	Topo	3,01E-05	1176,34	35,36		5,19E-05	1176,34	61,08	
	Meio	2,66E-05	1548,13	41,22	116,67	8,89E-05	1548,13	137,68	269,93
	Fundo	2,21E-05	1817,62	40,10		3,92E-05	1817,62	71,16	
Na	Topo	1,50E-03	1176,34	1761,31		1,40E-03	1176,34	1650,26	
	Meio	1,38E-03	1548,13	2137,96	6298,81	1,36E-03	1548,13	2100,92	6288,22
	Fundo	1,32E-03	1817,62	2399,53		1,40E-03	1817,62	2537,04	
K	Topo	3,10E-05	1176,34	36,51		1,04E-04	1176,34	122,53	
	Meio	1,94E-04	1548,13	300,74	382,55	1,46E-04	1548,13	225,56	428,10
	Fundo	2,49E-05	1817,62	45,30		4,40E-05	1817,62	80,00	
Fe	Topo	3,27E-04	1176,34	385,24		4,49E-04	1176,34	527,68	
	Meio	4,09E-04	1548,13	632,84	1818,28	5,41E-04	1548,13	837,48	2089,78
	Fundo	4,40E-04	1817,62	800,19		3,99E-04	1817,62	724,61	
Mn	Topo	2,23E-06	1176,34	2,63		1,63E-05	1176,34	19,12	
	Meio	2,04E-06	1548,13	3,15	13,65	5,31E-06	1548,13	8,22	39,47
	Fundo	4,33E-06	1817,62	7,87		6,67E-06	1817,62	12,13	
Ni	Topo	0,00E+00	1176,34	0,00		0,00	1176,34	0,00	
	Meio	3,61E-08	1548,13	0,06	0,06	0,00	1548,13	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1817,62	0,00		0,00	1817,62	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1176,34	10,23		1,76E-05	1176,34	20,75	
	Meio	8,68E-06	1548,13	13,43	42,63	1,85E-05	1548,13	28,60	80,08
	Fundo	1,04E-05	1817,62	18,97		1,69E-05	1817,62	30,74	
Zn	Topo	1,27E-06	1176,34	1,50		3,93E-06	1176,34	4,63	
	Meio	1,45E-06	1548,13	2,24	6,99	1,80E-06	1548,13	2,79	11,93
	Fundo	1,79E-06	1817,62	3,25		2,48E-06	1817,62	4,51	
Cd	Topo	1,78E-07	1176,34	0,21		8,05E-08	1176,34	0,09	
	Meio	2,74E-07	1548,13	0,42	0,78	0,00E+00	1548,13	0,00	0,30
	Fundo	8,03E-08	1817,62	0,15		1,13E-07	1817,62	0,21	
Cr	Topo	1,18E-07	1176,34	0,14		0,00	1176,34	0,00	
	Meio	1,18E-07	1548,13	0,18	0,53	0,00	1548,13	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1817,62	0,21		0,00	1817,62	0,00	

Tabela 36 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza + lama, extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no solo} inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no solo} final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1372,01	1,84		2,81E-05	1372,01	38,52	
	Meio	1,86E-06	1525,83	2,84	7,85	5,08E-05	1525,83	77,45	175,99
	Fundo	2,06E-06	1537,16	3,17		3,90E-05	1537,16	60,02	
Ca	Topo	3,63E-04	1372,01	497,42		1,01E-03	1372,01	1379,64	
	Meio	4,30E-04	1525,83	655,60	1615,13	9,79E-04	1525,83	1493,75	3905,68
	Fundo	3,01E-04	1537,16	462,11		6,72E-04	1537,16	1032,29	
Mg	Topo	3,01E-05	1372,01	41,24		3,88E-05	1372,01	53,27	
	Meio	2,66E-05	1525,83	40,62	115,77	4,01E-05	1525,83	61,15	159,72
	Fundo	2,21E-05	1537,16	33,91		2,95E-05	1537,16	45,29	
Na	Topo	1,50E-03	1372,01	2054,28		1,28E-03	1372,01	1751,26	
	Meio	1,38E-03	1525,83	2107,17	6190,73	1,23E-03	1525,83	1883,56	5594,87
	Fundo	1,32E-03	1537,16	2029,28		1,28E-03	1537,16	1960,06	
K	Topo	3,10E-05	1372,01	42,58		3,40E-05	1372,01	46,59	
	Meio	1,94E-04	1525,83	296,41	377,30	2,03E-05	1525,83	30,92	89,13
	Fundo	2,49E-05	1537,16	38,31		7,56E-06	1537,16	11,62	
Fe	Topo	3,27E-04	1372,01	449,32		2,32E-04	1372,01	317,67	
	Meio	4,09E-04	1525,83	623,73	1749,77	4,27E-04	1525,83	651,66	1569,50
	Fundo	4,40E-04	1537,16	676,72		3,90E-04	1537,16	600,17	
Mn	Topo	2,23E-06	1372,01	3,06		7,44E-06	1372,01	10,20	
	Meio	2,04E-06	1525,83	3,11	12,82	9,33E-06	1525,83	14,23	31,41
	Fundo	4,33E-06	1537,16	6,65		4,54E-06	1537,16	6,98	
Ni	Topo	0,00E+00	1372,01	0,00		0,00	1372,01	0,00	
	Meio	3,61E-08	1525,83	0,06	0,06	0,00	1525,83	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1537,16	0,00		0,00	1537,16	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1372,01	11,93		1,17E-05	1372,01	16,05	
	Meio	8,68E-06	1525,83	13,24	41,21	2,02E-05	1525,83	30,84	72,04
	Fundo	1,04E-05	1537,16	16,04		1,64E-05	1537,16	25,15	
Zn	Topo	1,27E-06	1372,01	1,75		4,10E-06	1372,01	5,62	
	Meio	1,45E-06	1525,83	2,21	6,71	2,40E-06	1525,83	3,67	13,37
	Fundo	1,79E-06	1537,16	2,75		2,65E-06	1537,16	4,07	
Cd	Topo	1,78E-07	1372,01	0,24		8,07E-08	1372,01	0,11	
	Meio	2,74E-07	1525,83	0,42	0,79	0,00E+00	1525,83	0,00	0,14
	Fundo	8,03E-08	1537,16	0,12		1,61E-08	1537,16	0,02	
Cr	Topo	1,18E-07	1372,01	0,16		0,00	1372,01	0,00	
	Meio	1,18E-07	1525,83	0,18	0,52	0,00	1525,83	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1537,16	0,18		0,00	1537,16	0,00	

Tabela 37 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de cinza, extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no solo} inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no solo} final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1264,93	1,70		5,14E-05	1264,93	65,02	
	Meio	1,86E-06	1551,11	2,89	8,19	5,20E-05	1551,11	80,65	235,58
	Fundo	2,06E-06	1750,83	3,61		5,14E-05	1750,83	89,92	
Ca	Topo	3,63E-04	1264,93	458,60		1,26E-03	1264,93	1598,72	
	Meio	4,30E-04	1551,11	666,47	1651,41	9,95E-04	1551,11	1543,39	4201,10
	Fundo	3,01E-04	1750,83	526,34		6,05E-04	1750,83	1058,99	
Mg	Topo	3,01E-05	1264,93	38,02		4,17E-05	1264,93	52,78	
	Meio	2,66E-05	1551,11	41,30	117,94	4,41E-05	1551,11	68,33	169,35
	Fundo	2,21E-05	1750,83	38,62		2,76E-05	1750,83	48,24	
Na	Topo	1,50E-03	1264,93	1893,96		1,30E-03	1264,93	1645,03	
	Meio	1,38E-03	1551,11	2142,08	6347,39	1,34E-03	1551,11	2081,32	6154,43
	Fundo	1,32E-03	1750,83	2311,36		1,39E-03	1750,83	2428,08	
K	Topo	3,10E-05	1264,93	39,26		1,92E-04	1264,93	242,25	
	Meio	1,94E-04	1551,11	301,32	384,22	1,29E-04	1551,11	199,91	513,17
	Fundo	2,49E-05	1750,83	43,64		4,06E-05	1750,83	71,01	
Fe	Topo	3,27E-04	1264,93	414,25		4,31E-04	1264,93	545,61	
	Meio	4,09E-04	1551,11	634,06	1819,10	4,79E-04	1551,11	743,01	2244,92
	Fundo	4,40E-04	1750,83	770,79		5,46E-04	1750,83	956,31	
Mn	Topo	2,23E-06	1264,93	2,82		1,45E-05	1264,93	18,33	
	Meio	2,04E-06	1551,11	3,16	13,56	1,36E-05	1551,11	21,04	53,06
	Fundo	4,33E-06	1750,83	7,58		7,82E-06	1750,83	13,70	
Ni	Topo	0,00E+00	1264,93	0,00		0,00	1264,93	0,00	
	Meio	3,61E-08	1551,11	0,06	0,06	0,00	1551,11	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1750,83	0,00		0,00	1750,83	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1264,93	11,00		1,63E-05	1264,93	20,63	
	Meio	8,68E-06	1551,11	13,46	42,73	1,76E-05	1551,11	27,36	77,57
	Fundo	1,04E-05	1750,83	18,27		1,69E-05	1750,83	29,58	
Zn	Topo	1,27E-06	1264,93	1,61		3,67E-06	1264,93	4,64	
	Meio	1,45E-06	1551,11	2,24	6,99	3,48E-06	1551,11	5,39	14,71
	Fundo	1,79E-06	1750,83	3,13		2,68E-06	1750,83	4,69	
Cd	Topo	1,78E-07	1264,93	0,22		1,13E-07	1264,93	0,14	
	Meio	2,74E-07	1551,11	0,43	0,79	1,61E-08	1551,11	0,02	0,42
	Fundo	8,03E-08	1750,83	0,14		1,45E-07	1750,83	0,25	
Cr	Topo	1,18E-07	1264,93	0,15		0,00	1264,93	0,00	
	Meio	1,18E-07	1551,11	0,18	0,54	0,00	1551,11	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1750,83	0,21		0,00	1750,83	0,00	

Tabela 38 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de cinza, extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no solo} inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no solo} final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1123,88	1,51		4,64E-05	1123,88	52,19	
	Meio	1,86E-06	1287,86	2,40	7,47	5,21E-05	1287,86	67,15	216,37
	Fundo	2,06E-06	1728,77	3,57		5,61E-05	1728,77	97,03	
Ca	Topo	3,63E-04	1123,88	407,46		1,10E-03	1123,88	1235,67	
	Meio	4,30E-04	1287,86	553,35	1480,53	1,03E-03	1287,86	1331,32	3752,86
	Fundo	3,01E-04	1728,77	519,71		6,86E-04	1728,77	1185,87	
Mg	Topo	3,01E-05	1123,88	33,78		5,61E-05	1123,88	63,04	
	Meio	2,66E-05	1287,86	34,29	106,21	5,34E-05	1287,86	68,75	192,40
	Fundo	2,21E-05	1728,77	38,14		3,51E-05	1728,77	60,61	
Na	Topo	1,50E-03	1123,88	1682,76		1,42E-03	1123,88	1591,44	
	Meio	1,38E-03	1287,86	1778,53	5743,53	1,29E-03	1287,86	1661,93	5627,00
	Fundo	1,32E-03	1728,77	2282,24		1,37E-03	1728,77	2373,63	
K	Topo	3,10E-05	1123,88	34,88		2,07E-04	1123,88	232,79	
	Meio	1,94E-04	1287,86	250,18	328,15	7,87E-05	1287,86	101,33	616,92
	Fundo	2,49E-05	1728,77	43,09		1,64E-04	1728,77	282,80	
Fe	Topo	3,27E-04	1123,88	368,06		3,31E-04	1123,88	372,22	
	Meio	4,09E-04	1287,86	526,45	1655,59	4,04E-04	1287,86	520,94	1866,97
	Fundo	4,40E-04	1728,77	761,08		5,63E-04	1728,77	973,82	
Mn	Topo	2,23E-06	1123,88	2,51		1,24E-05	1123,88	13,93	
	Meio	2,04E-06	1287,86	2,62	12,61	1,28E-05	1287,86	16,49	45,90
	Fundo	4,33E-06	1728,77	7,48		8,95E-06	1728,77	15,47	
Ni	Topo	0,00E+00	1123,88	0,00		0,00	1123,88	0,00	
	Meio	3,61E-08	1287,86	0,05	0,05	0,00	1287,86	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1728,77	0,00		0,00	1728,77	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1123,88	9,77		1,58E-05	1123,88	17,79	
	Meio	8,68E-06	1287,86	11,17	38,99	1,73E-05	1287,86	22,23	73,10
	Fundo	1,04E-05	1728,77	18,04		1,91E-05	1728,77	33,08	
Zn	Topo	1,27E-06	1123,88	1,43		3,54E-06	1123,88	3,98	
	Meio	1,45E-06	1287,86	1,86	6,39	3,85E-06	1287,86	4,96	13,66
	Fundo	1,79E-06	1728,77	3,10		2,73E-06	1728,77	4,73	
Cd	Topo	1,78E-07	1123,88	0,20		1,45E-07	1123,88	0,16	
	Meio	2,74E-07	1287,86	0,35	0,69	1,13E-07	1287,86	0,15	0,56
	Fundo	8,03E-08	1728,77	0,14		1,45E-07	1728,77	0,25	
Cr	Topo	1,18E-07	1123,88	0,13		0,00	1123,88	0,00	
	Meio	1,18E-07	1287,86	0,15	0,49	0,00	1287,86	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1728,77	0,20		0,00	1728,77	0,00	

Tabela 39 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #1 da coluna com aplicação de CaCO_3 , extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no solo} inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no solo} final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1201,71	1,61		4,88E-05	1201,71	58,64	
	Meio	1,86E-06	1538,15	2,86	8,07	4,49E-05	1538,15	69,06	238,16
	Fundo	2,06E-06	1744,64	3,60		6,33E-05	1744,64	110,46	
Ca	Topo	3,63E-04	1201,71	435,68		1,40E-03	1201,71	1680,85	
	Meio	4,30E-04	1538,15	660,90	1621,06	1,04E-03	1538,15	1603,26	4254,40
	Fundo	3,01E-04	1744,64	524,48		5,56E-04	1744,64	970,29	
Mg	Topo	3,01E-05	1201,71	36,12		4,22E-05	1201,71	50,73	
	Meio	2,66E-05	1538,15	40,95	115,56	4,61E-05	1538,15	70,93	170,42
	Fundo	2,21E-05	1744,64	38,49		2,79E-05	1744,64	48,76	
Na	Topo	1,50E-03	1201,71	1799,30		1,33E-03	1201,71	1600,96	
	Meio	1,38E-03	1538,15	2124,18	6226,67	1,35E-03	1538,15	2072,55	6631,00
	Fundo	1,32E-03	1744,64	2303,19		1,70E-03	1744,64	2957,49	
K	Topo	3,10E-05	1201,71	37,30		2,86E-05	1201,71	34,40	
	Meio	1,94E-04	1538,15	298,80	379,58	8,02E-05	1538,15	123,33	168,70
	Fundo	2,49E-05	1744,64	43,49		6,29E-06	1744,64	10,97	
Fe	Topo	3,27E-04	1201,71	393,55		4,19E-04	1201,71	503,99	
	Meio	4,09E-04	1538,15	628,76	1790,38	3,70E-04	1538,15	568,68	2007,70
	Fundo	4,40E-04	1744,64	768,07		5,36E-04	1744,64	935,04	
Mn	Topo	2,23E-06	1201,71	2,68		1,07E-05	1201,71	12,87	
	Meio	2,04E-06	1538,15	3,13	13,37	1,09E-05	1538,15	16,76	41,86
	Fundo	4,33E-06	1744,64	7,55		7,01E-06	1744,64	12,23	
Ni	Topo	0,00E+00	1201,71	0,00		0,00	1201,71	0,00	
	Meio	3,61E-08	1538,15	0,06	0,06	0,00	1538,15	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1744,64	0,00		0,00	1744,64	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1201,71	10,45		1,70E-05	1201,71	20,42	
	Meio	8,68E-06	1538,15	13,34	42,00	1,57E-05	1538,15	24,12	76,95
	Fundo	1,04E-05	1744,64	18,21		1,86E-05	1744,64	32,42	
Zn	Topo	1,27E-06	1201,71	1,53		3,51E-06	1201,71	4,22	
	Meio	1,45E-06	1538,15	2,23	6,88	3,75E-06	1538,15	5,76	14,28
	Fundo	1,79E-06	1744,64	3,12		2,46E-06	1744,64	4,30	
Cd	Topo	1,78E-07	1201,71	0,21		4,84E-08	1201,71	0,06	
	Meio	2,74E-07	1538,15	0,42	0,78	1,13E-07	1538,15	0,17	0,54
	Fundo	8,03E-08	1744,64	0,14		1,77E-07	1744,64	0,31	
Cr	Topo	1,18E-07	1201,71	0,14		0,00	1201,71	0,00	
	Meio	1,18E-07	1538,15	0,18	0,53	0,00	1538,15	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1744,64	0,21		0,00	1744,64	0,00	

Tabela 40 - Valores obtidos dos elementos analisados para a réplica #2 da coluna com aplicação de CaCO₃, extração de Mehlich

	Camada	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} inicial (mg)	Σ m _{no solo} inicial (mg)	Fração (g/g solo)	m _{solo} seco (g)	m _{no solo} final (mg)	Σ m _{no solo} final (mg)
P	Topo	1,34E-06	1644,22	2,21		6,58E-05	1644,22	108,19	
	Meio	1,86E-06	1503,07	2,80	8,35	4,18E-05	1503,07	62,83	238,37
	Fundo	2,06E-06	1625,40	3,35		4,14E-05	1625,40	67,35	
Ca	Topo	3,63E-04	1644,22	596,11		8,38E-04	1644,22	1378,50	
	Meio	4,30E-04	1503,07	645,82	1730,57	9,73E-04	1503,07	1463,06	4477,64
	Fundo	3,01E-04	1625,40	488,64		1,01E-03	1625,40	1636,08	
Mg	Topo	3,01E-05	1644,22	49,42		4,87E-05	1644,22	79,99	
	Meio	2,66E-05	1503,07	40,02	125,30	4,66E-05	1503,07	70,09	228,86
	Fundo	2,21E-05	1625,40	35,86		4,85E-05	1625,40	78,78	
Na	Topo	1,50E-03	1644,22	2461,86		1,65E-03	1644,22	2714,81	
	Meio	1,38E-03	1503,07	2075,74	6683,37	1,42E-03	1503,07	2139,93	6900,83
	Fundo	1,32E-03	1625,40	2145,77		1,26E-03	1625,40	2046,08	
K	Topo	3,10E-05	1644,22	51,03		3,14E-04	1644,22	516,37	
	Meio	1,94E-04	1503,07	291,99	383,53	1,76E-04	1503,07	264,07	832,31
	Fundo	2,49E-05	1625,40	40,51		3,19E-05	1625,40	51,87	
Fe	Topo	3,27E-04	1644,22	538,46		4,59E-04	1644,22	754,46	
	Meio	4,09E-04	1503,07	614,42	1868,46	3,32E-04	1503,07	498,79	1813,36
	Fundo	4,40E-04	1625,40	715,57		3,45E-04	1625,40	560,11	
Mn	Topo	2,23E-06	1644,22	3,67		7,81E-06	1644,22	12,85	
	Meio	2,04E-06	1503,07	3,06	13,77	1,01E-05	1503,07	15,20	47,05
	Fundo	4,33E-06	1625,40	7,04		1,17E-05	1625,40	19,00	
Ni	Topo	0,00E+00	1644,22	0,00		0,00	1644,22	0,00	
	Meio	3,61E-08	1503,07	0,05	0,05	0,00	1503,07	0,00	0,00
	Fundo	0,00E+00	1625,40	0,00		0,00	1625,40	0,00	
Cu	Topo	8,69E-06	1644,22	14,29		1,65E-05	1644,22	27,09	
	Meio	8,68E-06	1503,07	13,04	44,30	1,44E-05	1503,07	21,59	74,06
	Fundo	1,04E-05	1625,40	16,96		1,56E-05	1625,40	25,37	
Zn	Topo	1,27E-06	1644,22	2,10		3,55E-06	1644,22	5,83	
	Meio	1,45E-06	1503,07	2,17	7,18	3,04E-06	1503,07	4,57	16,15
	Fundo	1,79E-06	1625,40	2,91		3,53E-06	1625,40	5,74	
Cd	Topo	1,78E-07	1644,22	0,29		1,45E-07	1644,22	0,24	
	Meio	2,74E-07	1503,07	0,41	0,83	8,06E-08	1503,07	0,12	0,60
	Fundo	8,03E-08	1625,40	0,13		1,46E-07	1625,40	0,24	
Cr	Topo	1,18E-07	1644,22	0,19		0,00	1644,22	0,00	
	Meio	1,18E-07	1503,07	0,18	0,56	0,00	1503,07	0,00	0,00
	Fundo	1,18E-07	1625,40	0,19		0,00	1625,40	0,00	